

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství



# Bakalářská práce

Možnosti ovlivnění mikrostruktury přesných odlitků

Possibilities of Influence of Microstructure in Investment Casting  
Technology

2018

Jan Hruběš

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Hrubeš**

Studijní program: B2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor: 2109R038 Moderní metalurgické technologie

Téma: **Možnosti ovlivnění mikrostruktury přesných odlitků**  
**Possibilities of Influence of Microstructure in Investment Casting Technology**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Cíl práce
2. Popis technologie lití na vytavitelný model
3. Možnosti ovlivnění mikrostruktury přesných odlitků
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] MRÁZEK, M. Technologie přesného lití. *Slévárenství*, 2008, roč. 56, č. 9–10, s. 468-471. ISSN 0037-6825.
- [2] BOLIBRUCHOVÁ, D., TILLOVÁ, E. *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. Vyd.1. Žilina: EDIS, 2005. 180 s. ISBN 80-8070-485-6.
- [3] BROWNE, D., O'MAHONEY, D. *Interface heat transfer in investment casting of aluminum alloys*. Metallurgical and Materials Transactions A. 2001, Vol. 32, No. 12, pp. 3055-3063, ISSN 1043-5623.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

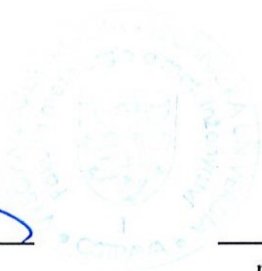
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Němec

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

  
prof. Ing. Karel Michalek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě

30.4.2018

Jan Hrubec

.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)



# Zásady pro vypracování bakalářské práce

## I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

Uspořádání bakalářské práce:

- |                                              |                              |
|----------------------------------------------|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah BP                  |
| 2. Originál zadání BP                        | 7. Textová část BP           |
| 3. Zásady pro vypracování BP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).



## **PODĚKOVÁNÍ:**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Lichému, Ph.D. a konzultantovi Ing. Jiřímu Němcovi ze společnosti Alucast s.r.o. za cenné rady, připomínky a pomoc při tvorbě bakalářské práce.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se bude zabývat vyhodnocováním strukturálních a mechanických hodnot hliníkových materiálů v závislosti na tepelném zpracování a rychlosti ochlazování. V její experimentální části se bude zabývat vyhodnocení vzorků slitiny hliníku AlSi7Mg0,6 na zkušebních vzorcích tloušťky 3 a 10 mm, které byly odlity do keramické formy, metodou vypařitelného modelu firmou Alucast, s.r.o.. Práce se bude také zabývat vlivem doby výdrže na rozpouštěcím žíháním (RŽ) a na umělém stárnutí (US).

U vzorků bylo provedeno tepelné zpracování T6 dle normy AMS 2771C, přičemž po RŽ následovalo US v délce 3, 6, 9 a 12 hodin. K vyhodnocování délky US na mechanické a strukturální vlastnosti byly použity metody světelné mikroskopie a měření tvrdosti podle Brinella.

### **Klíčová slova**

Slitina hliníku AlSiMg0,6, umělé stárnutí, rozpouštěcí žíhání, strukturální a mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis will deal with evaluation of structural and mechanical values of aluminum materials in dependence on heat treatment and cooling rate. In its experimental part, the AlSi7Mg0.6 aluminum alloy samples will be evaluated on casting samples of thicknesses 3 and 10 mm, cast in ceramic form by Alucast, s.r.o., method of evaporation model. The work will also deal with the influence of dissolving heat treatment and artificial aging.

The T6 heat treatment according to the AMS 2771C standard was performed on the samples, followed by the US at 3, 6, 9 and 12 hours after the RZ. To evaluate the length of the US for mechanical and structural properties, light microscopy and Brinell hardness measurements were used.

### **Key words**

Aluminium alloy AlSiMg0,6, artificial ageing, dissolving heat treatment, structural and mechanical properties

# OBSAH

<b>1 ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 HLINÍK A JEHO SLITINY</b>	<b>2</b>
<i>2.1 Oblasti použití</i>	2
<b>3 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU</b>	<b>3</b>
<i>3.1 Chemické vlastnosti slitin</i>	3
<i>3.2 Vlastnosti slitin</i>	4
3.2.1 Slévárenské vlastnosti	4
3.2.2 Mechanické vlastnosti	6
<i>3.3 Al-Si-Mg Slitiny</i>	6
3.3.1 Slitiny AlSi7Mg0,3	7
3.3.2 Slitiny AlSi7Mg0,6	8
<b>4 KRYSTALIZACE EUTEKTIKA VE SLITINÁCH Al-Si</b>	<b>9</b>
<b>5 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU TYPU Al-Si</b>	<b>10</b>
<b>5.1 Krystalizace primární fáze <math>\alpha</math>(Al)</b>	<b>10</b>
5.1.1 Nukleace primární fáze $\alpha$ (Al)	10
<i>5.2 Očkování slitin hliníku</i>	11
5.2.1 Princip očkování podeutektických slitin hliníku	12
5.2.2 Očkovací prostředky	15
5.2.3 Vliv očkování na vlastnosti slitin	15
<i>5.3 Očkování slitiny AlSi9Mg0,45 předslitinami AlTi5B1 a AlTi3B3</i>	15
<i>5.4 Modifikace eutektika slitin Al-Si</i>	17
5.4.1 Modifikace stronciem	17
<b>6 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN</b>	<b>18</b>
<i>6.1 Definice, základní terminologie</i>	18
<i>6.2 Hodnoty mechanických vlastností hliníku a jeho slitin</i>	21
<b>7 METODA MĚŘENÍ TVRDOSTI PODLE BRINELLA</b>	<b>22</b>
<b>9 ZKUŠEBNÍ VZORKY</b>	<b>23</b>
<i>9.1 Slitina AlSi7Mg0,6</i>	23
<i>9.2 Experimentální vzorky</i>	23
<b>10 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ</b>	<b>25</b>



<i>10.1 Metoda tepelného zpracování T6</i>	25
<b>11 ZÁVISLOST TVRDOSTI NA TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ</b>	<b>27</b>
<i>11.1 Vyhodnocení vzorků podle tloušťky stěn a hodin vystavených TZ</i>	27
<b>12 METALOGRAFICKÉ VÝBRUSY</b>	<b>28</b>
<i>12.1 Porovnání vzorků 3mm a 10mm</i>	30
<b>13 ZÁVĚR</b>	<b>35</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>36</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>38</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ</b>	<b>39</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK</b>	<b>40</b>
<b>PŘÍLOHA 1</b>	<b>41</b>

# 1 ÚVOD

Přestože má hliník třetí největší procento zastoupení v zemské kůře, jeho průmyslová výroba odstartovala teprve roku 1859. V první polovině 20. století přispěla k výraznému nárůstu výroby hliníku možnost jeho využití v oblasti vojenské techniky v období druhé světové války. Pro srovnání na počátku 20. století byla celosvětová produkce 8 000 tun ročně a na začátku druhé světové války roku 1938 byla celková produkce 537 000 tun. Prudký růst výroby však pokračuje i v současnosti. V roce 2003 byla celosvětová výroba primárního hliníku 22-24 tun/rok a její nárůst během dalších 20 let je očekávám až o 600%. Z výše uvedených informací je patrné, že je hliník jakožto kov používán v průmyslu kovem mladým a na jeho celosvětový prudký vývoj by se mělo soustřeďovat čím dál víc pozornosti. Účelem této práce bude vysvětlit základní zpracování a použitelnost hliníku a jeho slitin. V jeho experimentální části se bude zabývat strukturou slitiny  $\text{AlSi7Mg0,6}$  v závislosti na tepelném zpracování a jejího využití v průmyslu.

## CÍLE PRÁCE

- Vypracovat teoretickou rešerši na téma, které vysvětluje současnou situaci zpracování a použití hliníků a jeho slitin.
- Provést metalografický rozbor slitiny  $\text{AlSi7Mg0,6}$ .
- Na základě vyhodnocení strukturálních a mechanických vlastností určit riziko odložení tepelného zpracování v řádů týdnů při zohlednění tloušťky materiálu.

## 2 HLINÍK A JEHO SLITINY

Hliník je lehký kov, bělavě šedé barvy. Je kujný a slévateľný; využití čistého hliníku pro účely slévání je však pro jeho nízké pevnostní vlastnosti malé. Je třetím nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře; jeho obsahy se odhadují na 7,5-8,3%. Je rozpustný ve zředěných kyselinách; hydroxidy alkalických kovů jej rozpouští za vzniku hlinitanů [1].

### 2.1 Oblasti použití

V současné době nalézají výrobky z hliníku a jeho slitin širokou škálu uplatnění. Zpracování technologie tváření a slévání jsou obory, které se pro slitiny hliníku vyvíjí ve světovém měřítku nejprogresivněji v porovnání s ostatními kovy a slitinami.

Za hlavní oblasti použití hliníku a jeho slitin lze považovat odvětví dopravní techniky, stavebnictví, strojírenského a elektrotechnického průmyslu, energetiku, potravinářství, chemický průmysl a další. Podíly těchto odvětví ve celosvětové statistice použití Al a jeho slitin za rok 2002 uvádí následující procentní údaje:

-doprava (letecká, lodní, železniční, automobilová)	59,1 %
-stavebnictví	18,4 %
-strojírenství	10,3 %
-elektrotechnický průmysl	7,2 %
-potravinářský	4,2 %
-ostatní	0,7 %

Z tabulky je patrné, že téměř 60% spotřeby hliníku a jeho slitin směřuje do oblasti průmyslu dopravy. Uvedená statistika představuje objem výrobků zhotovených jak technologiemi tváření tak i slévání [1].



### 3 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU

Pro produkci odlitků se výhradně používají hliníkové slitiny, jelikož vlastnosti hliníku v jeho čisté formě jsou pro výrobní činnost nedostačující. Jeho technologické a mechanické vlastnosti se dají výrazně zlepšit a zvýšit přísadovými prvky. Finální vlastnosti slitin jsou určeny vzájemnou kombinací přísadových prvků a jejich množstvím. [3].

#### 3.1 Chemické vlastnosti slitin

- Slitiny obsahují:
- základní prvek
  - hlavní přísadový prvek
  - vedlejší přísadové prvky
  - doprovodné prvky

**Základní prvek** určuje slitině její druh – pro nás bude základní prvek hliník.

**Hlavní přísadové prvky** se rozumí takové prvky, které mají na vlastnosti slitin největší vliv. Hlavní přísadové prvky vzájemně s prvky základními určují typ slitiny. Obsah těchto prvků bývá po prvku základním na druhém místě. Hlavními přísadovými prvky jsou ve slévárenských slitinách hliníku nejčastěji křemík, měď, a taky hořčík, občasné se používá zinek či mangan. Tyto prvky řadí slitiny do základních typů a přiděluje jim obvyklý název:

slitiny Al – Si  $\Rightarrow$  siluminy

slitiny Al – Cu  $\Rightarrow$  duralaluminium

slitiny Al – Mg  $\Rightarrow$  hydronalium

**Vedlejší přísadové prvky** jsou chemické částice, které do jisté míry zlepšují některé vlastnosti určitého typu slitiny – například mohou zvýšit mechanické vlastnosti, nebo obrobitelnost. Ovlivňují základní kovovou strukturu. Z hlediska tepelného zpracování jsou velmi důležité, a také mohou eliminovat nepříznivé účinky některého z doprovodných prvků. Vedlejší přísadové prvky jsou většinou obsaženy ve slitině méně než prvky hlavní přísadové. Prvků vedlejších slitina může obsahovat několik současně. Prvky, které nejvýznamněji ovlivňují slitiny daného typu, určují slitině její skupinu. Například siluminy mají skupiny Al-Si-Cu, Al-Si-Mg apod.

Pod pojmem **doprovodné prvky** se označují jako prvky, které byly do slitiny přidávány neúmyslně. Při dovršení jisté koncentrace většinou zhoršují technologické, mechanické nebo

chemické vlastnosti slitiny a jsou označovány za nežádoucí částice. Působí tak, že buď nepříznivě ovlivňují vlastnosti základního kovu, v němž jsou rozpuštěny, nebo tvoří vlastní fáze, které mají negativní vliv na vlastnosti slitiny. Obsah doprovodných prvků bývá limitován maximálně přípustným obsahem.

**Zdrojem doprovodných prvků jsou zejména vsázkové suroviny**, nebo se do slitiny dostávají v průběhu tavení z vyzdívky, z použitých tavicích přípravků nebo náradí. Velkým zdrojem nečistot bývá zejména přetavovaný šrot. Významným problémem u mnoha doprovodných prvků je obtížný způsob jejich odstranění ze slitiny. Často je v podmínkách sléváren vůbec odstranit nelze a snížit jejich obsah na přípustnou mez je možné pouze ředěním pomocí čistých surovin.

Podle počtu přísadových prvků (tedy kromě prvků doprovodných) se slitiny rozdělují na:

**binární** – obsahují pouze základní a hlavní přísadový prvek.

**ternární** – kromě základního a hlavního prvku obsahují jeden vedlejší přísadový prvek.

**vícesložkové** – obsahují několik vedlejších přísadových prvků [3, 2].

## 3.2 Vlastnosti slitin

Chemického složení hliníkových slitin a jeho volba vyplývá z celkového vyhodnocení nároků na vlastnosti, které souvisí s užíváním, ale i způsob výroby odlitků. Parametry které nejvíce ovlivňují výběr vhodné slitiny jsou:

- vlastnosti technologické
- vlastnosti mechanické
- možnosti tepelného zpracování

**Technologické vlastnosti** bývají ty vlastnosti slitin, které se nejvíce projevují při výrobě součástí. Jedny z nejdůležitějších technologických vlastností jsou zejména: slévárenské vlastnosti, odolnost vůči korozi, obrobitelnost, těsnost, svařitelnost, někdy také vlastnosti speciální jako například lešitelnost a možnost povrchové úpravy. [3].

### 3.2.1 Slévárenské vlastnosti

Pod pojmem slévárenské vlastnosti se rozumí takové vlastnosti, které souvisí s procesem odlévání. Jsou to především:

- zabíhavost slitiny

- sklon ke vzniku soustředěných staženin nebo ředin
- sklon k naplynění taveniny a ke vzniku plynových dutin v odlitcích
- sklon ke vzniku trhlin

Slévárenské vlastnosti úzce souvisí se šířkou **intervalu tuhnutí dané slitiny**. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, tj. s chemickým složením, které se blíží buď čistému kovu nebo ke složení eutektickému. Naopak slitiny se širokým intervalem tuhnutí mívají slévárenské vlastnosti špatné. Tyto slitiny mívají horší zabíhavost a zejména mají sklon ke vzniku rozptýlených staženin a mikrostaženin. Jejich nálitkování je málo účinné, nálitky mají krátkou dosazovací vzdálenost. Důsledkem je netěsnost odlitků.

**Zabíhavost** je technologická vlastnost, která udává schopnost tekutého kovu zaplňovat dutinu formy. Při posouzení schopnosti odlévání slitiny je nutno rozlišovat mezi tekutostí a zabíhavostí. Tekutost je fyzikální vlastnost, která je charakterizována viskozitou tekutého kovu a se zabíhavostí souvisí pouze částečně. Zabíhavost je závislá na šířce intervalu tuhnutí dané slitiny. Slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, jako jsou eutektické slitiny, mají dobrou zabíhavost, naopak slitiny se širokým dvoufázovým pásmem mají zabíhavost špatnou. Přítomnost oxidických vměstků v tavenině zabíhavost výrazně snižuje. Na zabíhavost se také uplatňuje vliv povrchového napětí, smáčivosti formy, modifikace taveniny apod. Zabíhavost jako technologická vlastnost určuje, jak tenkostěnné odlitky je možno odlévat a jak přesně bude kov kopírovat dutinu formy.

**Sklon ke vzniku staženin** charakterizuje objemový úbytek kovu během tuhnutí a tendenci ke vzniku soustředěných (vnitřních nebo vnějších) staženin, nebo rozptýlených staženin a ředin. Slitiny se sklonem ke vzniku soustředěných staženin lze dobře nálitkovat, odlitky mají dobrou těsnost. Takto tuhnou zejména slitiny s chemickým složením blízkým složení eutektickému. Slitiny se širokým dvoufázovým intervalem mají naopak sklon ke vzniku rozptýlených staženin a obtížně se nálitkují. Takové odlitky mívají horší těsnost.

**Sklon k naplynění** je charakterizován rozpustností plynů v tekutém stavu. Některé prvky naplynování zvyšují, jiné naopak snižují. Úroveň naplynění taveniny rozhoduje o tvorbě plynových bublin v odlitku.

**Odolnost proti vzniku trhlin a prasklin** je schopnost odolávat napětí, které vzniká vlivem smršťování v oblasti teplot tuhnutí a během ochlazování. Tato vlastnost je velmi důležitá zvláště u odlitků s nerovnoměrnými tloušťkami stěn, tvarově složitých odlitků, odlitků s tuhou konstrukcí a v případech, kdy je smršťování brzděno tuhou formou [3, 2].



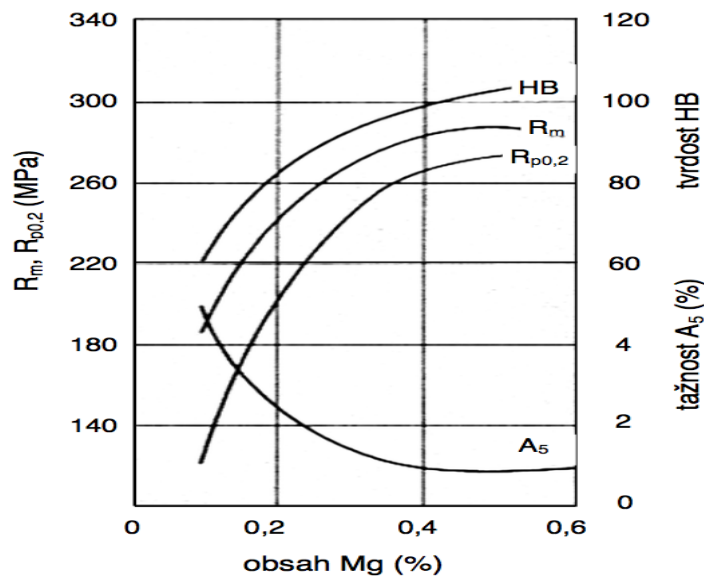
### 3.2.2 Mechanické vlastnosti

Vlastnosti mechanické jsou zejména závislé na druhu a charakteru základní kovové hmoty, na rozptýlení strukturních složek, na tvaru a přítomnosti intermetalických fází a v neposlední řadě na tepelném zpracování. **Jemnozrnná struktura jednoznačně pozitivně ovlivňuje všechny technologické vlastnosti slitin a také řadu vlastností mechanických.** Senzitivita vlastností slitin hliníku na rychlost tuhnutí je velice vysoká a při jejich odlévání se proto upřednostňují ty metody, které umožní zajistit co nejvyšší rychlost ochlazování při tuhnutí [3, 10].

### 3.3 Al-Si-Mg Slitiny

Tyto slitiny charakterizuje jejich obsah hořčíku, který je nejčastěji v množství 0,25-0,45 % (některé slitiny mohou obsahovat až 0,7%), který je specifický tím, že umožňuje slitiny tepelně vytvrzovat. Za normální rychlosti ochlazování se ve slitině hořčík uvolňuje jako fáze  $Mg_2Si$ . Tyto slitiny mají v litém stavu pouze běžné vlastnosti. Až následným **vytvrzováním získávají vysoké mechanické vlastnosti**. Al-Si-Mg jsou podeutektické slitiny a podle jejich obsahu křemíku se dají rozdělit do 2 kategorií, a to AlSi7Mg a AlSi10Mg. Slitiny, které mají vyšší obsah Si získávají lepší svařitelnost a především lepší slévárenské vlastnosti. Při výrobě se limituje obsah dalších doprovodných prvků na co nejnižší hodnoty obdobně jako u jiných skupin Al-Si.

Odlitky ze slitin AlSiMg se používají velmi často v leteckém a automobilovém průmyslu zejména pro **vysoce namáhané výrobky**. Po tepelném vytvrzení nabývají tyto slitiny velmi vysoké mechanické vlastnosti  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$  a HB, oproti litému stavu se vytvrzováním mírně snižuje tažnost. Na zvýšení tvrdosti matrice má nejvyšší podíl hořčík, který zlepšuje i obrobitelnost apod. Obrázek č. 1 je znázorňuje vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti vytvrzené slitiny AlSi9 odlité do pískové formy [3].



Obrázek 1 Slitina Al-Si9 po vytvrzení [3]

### 3.3.1 Slitiny AlSi7Mg0,3

**Charakteristika:** - Druh vysokopevných slitin s dobrou houževnatostí a tažností. Ve slitině je obsaženo minimální množství nečistot a příměsí. Má výborné slévárenské vlastnosti, dobrou odolnost proti korozi, svařitelnost a obrobitelnost.

**Odlévání:** - Nejčastěji se odlévá do kovových nebo pískových forem nízkotlakým litím nebo gravitačně. Sklon ke vzniku staženin má slitina velmi malý. Zjemnění primárního zrna je vhodné provádět očkovacími přípravky na bázi Ti a B zároveň s modifikací eutektika.

**Tepelné zpracování:** - Vytvrditelná slitina. Používá se ve stavu T6 – vytvrzeném (viz. kapitola 6 tepelné zpracování).

**Použití:** - Nejčastější aplikace je na součástky pro raketový průmysl a letecký průmysl, části motoru, díly podvozků, rámy a jiné odlitky, které potřebují vysokou houževnatost a pevnost. V současné době se zkoušejí testy slitiny AlZn10Si8Mg, která se vytvrzuje za pokojové teploty a která by mohla díky své vysoké pevnosti v cyklické únavě nahradit stávající AlSi7Mg0,3 [3, 7].

### 3.3.2 Slitiny AlSi7Mg0,6

Charakteristika: - Vlastnostmi příbuzná slitina s předchozím typem, dosahuje však ještě vyšší pevnosti (je zde myšlena slitina s nejvyššími mechanickými vlastnostmi typu Al-Si). Slitina má relativně špatnou obrobitelnost.

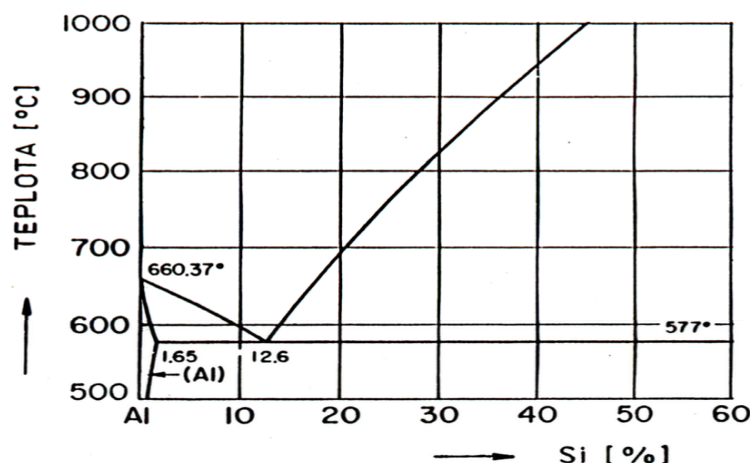
Použití: - Využívá se na odlitky s vysokými nároky na houževnatost a pevnost. Uplatňuje především v leteckém průmyslu, kde se z ní odlévají vysoce namáhané motorové součástky, ventilátory, vysokorychlostní dmychadla apod. [3].



## 4 KRYSTALIZACE EUTEKTIKA VE SLITINÁCH Al-Si

Slitiny Al-Si, běžně nazýváme jako siluminy. Patří mezi nejdůležitější typy slévárenských slitin hliníku a tvoří převážnou produkci hliníkových odlitků.

Křemík se v hliníku vyznačuje jen velmi omezenou rozpustností, která je při eutektické teplotě pouze 1,65 % Si a pokud dochází poklesu teploty tak se rozpustnost dále snižuje – například již při teplotě 300°C se rozpustnost pohybuje kolem 0,22 %. Obsah křemíku je ve slévárenských slitinách vždy vyšší než je maximální rozpustnost v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$ , proto obsahují vždy eutektikum  $\alpha(\text{Al})$ -Si. Koncentrace eutektického křemíku je 12,6 % Si (podle některých zdrojů jen 11,7 % Si), **eutektické teplota je 577°C**. Rovnovážný diagram je uveden na obr. 2 [3].

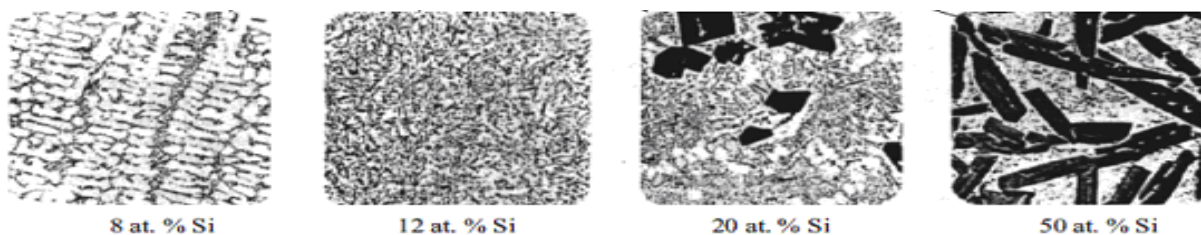


Obrázek 2 Rovnovážný diagram Al-Si [3]

Podle obsahu křemíku se siluminy rozdělují na:

- podeutektické
- eutektické
- nadeutektické

Obrázek č. 3 popisuje jednotlivé fáze diagramu Al-Si kdy struktura podeutektických siluminů je nejčastěji 5-11% Si a struktura nadeutektických siluminů 14-17% Si [3].



Obrázek 3 popisující jednotlivé fáze diagramu Al-Si [3]

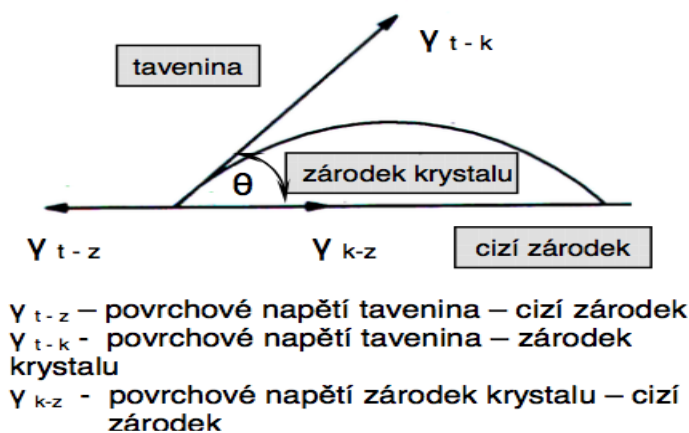
## 5 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU TYPU Al- Si

### 5.1 Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$

Podeutektické složení má drtivá většina slévárenských slitin hliníku a jejich krystalizace proto začíná zrodem primární fáze  $\alpha(\text{Al})$ . Průběh a podmínky vzniku a následného růstu této fáze jsou totožné pro všechny typy podeutektických slitin [3].

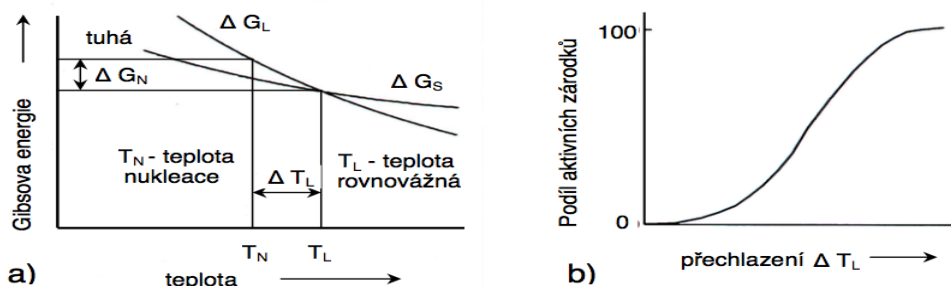
#### 5.1.1 Nukleace primární fáze $\alpha(\text{Al})$

U technických slitin dochází ke krystalizaci fáze  $\alpha(\text{Al})$  mechanismem heterogenní nukleace na zárodcích cizích. Jako krystalizační zárodky působí v nejvyšší míře spinely a oxidy, případně jiné elementy, které se v tavenině vyskytují, dále také stěna formy. Krystalizačním zárodkem nemusí být vždy všechny cizí částice. Ke správnému působení částice jako zárodek je nezbytné, aby mezi tuhnoucí fází a částicí byla mezifázová energie co nejmenší, to znamená aby zárodek byl smáčivý tuhnoucí fází. Jako měřítko smáčivosti se používá kontaktní úhel  $\Theta$  mezi tuhnoucí fází a krystalizačním zárodkem – obr. 4. Čím menší úhel menší, tím lepší smáčivost komponentů.



Obrázek 4 smáčivost tuhnoucí fáze a krystalizačního zárodku [3]

Aktivační energie  $\Delta G_N$  pro vznik zárodků je příměrná hodnotě přechlazení pod rovnovážnou teplotu tuhnutí  $\Delta T_L$  – obr. 5 a. Pokud je aktivační energie větší, aktivují se i méně energeticky výhodné zárodky. To znamená, že čím je větší přechlazení, tím se navyšuje počet aktivních zárodků. – obr. 5 b [3].



Obrázek 5 aktivační energie pro nukleaci aktivních zárodků a vliv přechlazení na jejich počet [3]

## 5.2 Očkování slitin hliníku

Existuje několik teorií na vysvětlení důvodů zjemnění  $\alpha$ -fáze:

- teorie zakládající se na peritektické proměně v soustavě hliník – přechodný kov,
- teorie zakládající se na vzniku intermetalických sloučenin hliníku a přechodného kovu, příp. karbidu přechodného kovu,
- teorie vycházející z elektronové stavby přechodných kovů, přičemž zjemňující účinek kovu je tím silnější, čím méně elektronů se nachází na d-dráze jeho atomů.

Velikost zrn  $\alpha(\text{Al})$  fáze je jedním z podstatných faktorů, které mají na vlastnosti hliníkových slitin vliv. V každém zrně se vyskytuje několik dendritů, rostoucích z jednoho krystalizačního zárodku. Jejich velikost se pohybuje nejčastěji v rozmezí 1-10mm. Disperzita dendritů je popisována hodnotou DAS, která se pohybuje v mezích 10-150  $\mu\text{m}$ .

Velikosti primárního zrna a jeho význam na vlastnosti slitiny je tím větší, čím více je ve slitině primární fáze  $\alpha(\text{Al})$ . Jsou zde na mysli tedy zejména o slitiny Al-Cu (které obsahují pouze primární fázi  $\alpha(\text{Al})$ ) a slitiny Al-Si, které mají nižší obsah křemíku. Pokud roste obsah křemíku, roste i obsah eutektika, proto převládá vliv tvaru eutektického křemíku a vliv disperzity  $\alpha(\text{Al})$  je menší.

Pokud dochází k intenzivnímu ochlazování, nastává i velké přechlazení taveniny pod rovnovážnou teplotu krystalizace, při kterém se aktivují i nukleační zárodky, které nejsou za normálního přechlazení příznivé. Tímto se získá jemnozrná struktura bez použití metalurgických zásahů. Tento mechanismus, kterým dochází ke zjemnění zrna je charakteristický pro tenkostěnné odlitky a odlitky odlité do kovové formy. U odlitků s větší tloušťkou stěn a zejména pokud se odlévají do pískových forem je intenzita chladnutí podstatně

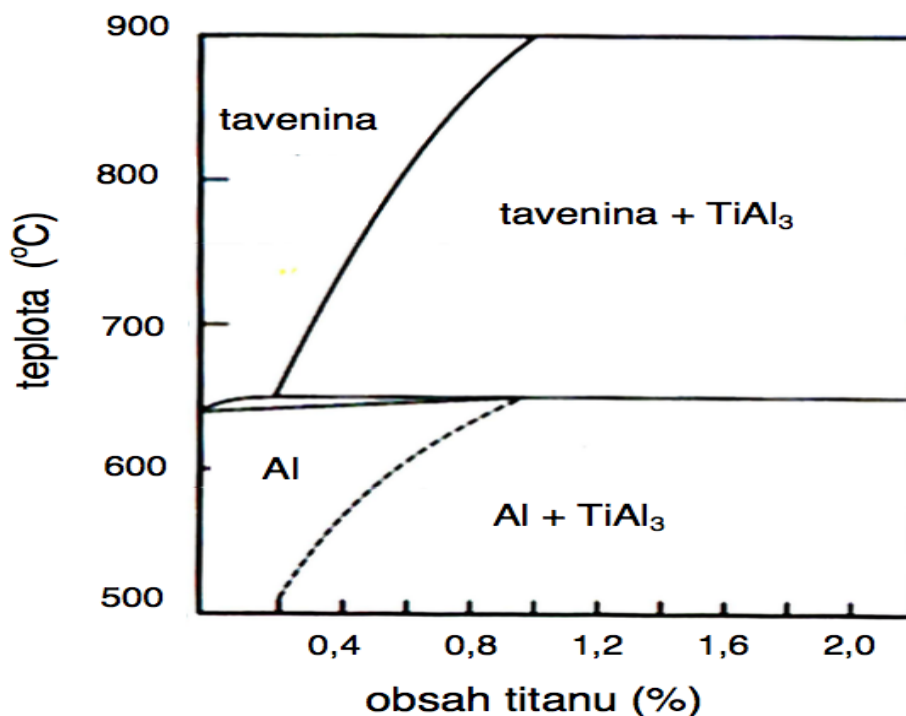
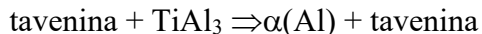
nižší a proto slitina vykazuje hrubozrnnou strukturu. U těchto případů se dosahuje zjemnění zrna očkovaním. Následující kapitola se zabývá očkovaním primární fáze  $\alpha(\text{Al})$ , která je hlavní fází krystalizace většiny hliníkových slitin [3, 5].

### 5.2.1 Princip očkování podeutektických slitin hliníku

Hlavní cílem očkování je zjemnění primární fáze a to pomocí vnášení nukleačních zárodků, respektive částic, ze kterých se nukleační zárodky vytváří. Očkováním se nemění ani intenzita ochlazování a v podstatě ani hodnota DAS. **Z toho důvodu je účinek očkování menší, než účinek rychlého chladnutí.**

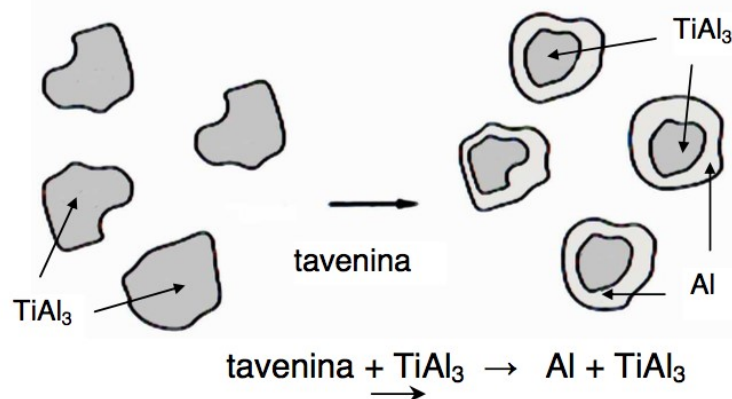
Nejčastěji se provádí očkování podeutektických slitin hliníku titanem a nebo kombinací bóru a titanu. Tyto dva prvky se zavádí do taveniny pomocí očkovacích solí, (např.  $\text{K}_2\text{TiF}_6$  nebo  $\text{KBF}_4$  apod.), v podobě předslitin Al-Ti nebo Al-Ti-B nebo očkovacích tablet.

Při očkování na bázi titanu reaguje titan s hliníkem a vzniká intermetalická fáze  $\text{TiAl}_3$ . Tato fáze má kubickou plošně centrovanou mřížku blízkou mřížce hliníku a je proto bezmála ideálním krystalizačním zárodkem. Při peritektické reakci na teplotě  $665^\circ\text{C}$  reaguje fáze  $\text{TiAl}_3$  s taveninou hliníku (obr. 6) podle rovnice:



Obrázek 6 Rovnovážná diagram Al-Ti [3]

Kolem částic  $\text{TiAl}_3$  se začínají tvořit obálky tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$  a na ní pak pokračuje další růst dendritů hliníku – obr. 7 Částice  $\text{TiAl}_3$  tvoří poměrně hrubé útvary s velikostí až 100  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 7 Tvorba zárodků  $\text{TiAl}_3$  při peritektické reakci v systému Al-Ti [3]

V očkovacích tabletách je obsažena směs očkovacích solí v různých poměrech a koncentracích tak, aby jejich účinek byl ideální pro jejich určitý druh slitin. Očkovací tablety se obvykle dávkuje v množství 0,1-0,4 % hmotnosti taveniny.

U předslitin určených k očkování (např. Al-Ti) bývá titan zastoupen obvykle do 5 % a je v nich už přítomen v intermetalické fázi  $\text{TiAl}_3$ . Čím je jemnější disperzita  $\text{TiAl}_3$ , tím je také vyšší účinek očkovací předslitiny. Pro účinné zjemnění primární fáze  $\alpha\text{-Al}$  je potřeba do taveniny vnést cca 0,02-0,1 % Ti.

V naočkované tavenině se zárodky  $\text{TiAl}_3$  postupně rozpouští a očkovací účinek po čase odeznívá. Nejúčinnější očkovací efekt předslitin Al-Ti obvykle trvá maximálně 30 až 45 minut.

Další možnosti zlepšení očkovacího účinku představují očkovadla s obsahem Ti a B. **Předslitiny s Ti a B nejčastěji obsahují 5 % Ti a 1 % B** v různých kombinacích. Bór neúčinkuje sám jako očkovadlo, musí být vždy v kombinaci s titanem. V kombinaci s hliníkem a titanem vytváří intermetalické fáze  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{AlB}_2$ , nebo  $(\text{Al,Ti})\text{B}_2$  o velikosti 0,5-2  $\mu\text{m}$ , tedy mnohem menší, než tvoří samotný  $\text{TiAl}_3$ . Tyto elementy dále fungují jako krystalizační zárodky. Zejména  $\text{AlB}_2$  má již při velmi malém přechlazení pod rovnovážnou teplotu likvidu dobrý očkovací účinek, a proto působí i při pomalém ochlazování (např. při lití do písku nebo silnostěnných odlitků do kokil). S morfologií intermetalických částic úzce souvisí i jejich účinek jako očkovacích slitin. Je závislý na způsobu výroby předslitin a jejich koncentraci obou prvků. Bór způsobuje to, že se rychlost odeznívání značně zpomalí a očkovací účinek zůstává dokonce i po přetavení. Obecně se má za to, že se optimální účinek vyvolává použitím

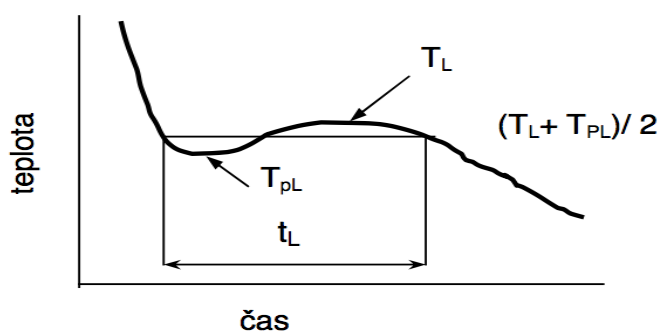
očkovačel s poměrem  $Ti:B < 2,2:1$  (což je stechiometrický poměr těchto prvků ve fázi  $TiB_2$ ). Například norská firma Hydrelko vyvinula očkovací předslitinu Al-1,7%B-1,7%Ti s názvem Tibloy. Dochází-li k očkovaní touto předslitinou, dosahuje se účinného zjemnění primárního zrna a dlouhé doby odeznívání při podstatně lepší zabíhavosti slitiny.

**Obsah bóru** ve slitině by neměl přesahovat **0,004 % B** (to vychází z maximálního dávkování asi 0,2 % očkovadla). Pokud je obsah bóru vyšší, dochází k vytváření sraženin boridů a k jejich usazování. To může způsobit jednak vytváření tvrdých shluků sedimentů na odlitcích, ale také nárosty v peci.

Pomocí porovnání zkušebních vzorků s etalony se posuzuje **zjemnění primárního zrna**. Také můžeme k vyhodnocení použít **KF číslo** (KF – Kornfeinung), které vychází ze záznamu termické analýzy. K tomuto měření se využívá střední teploty a doby prodlevy na křivce chladnutí v oblasti primární nukleace – obr. 8.

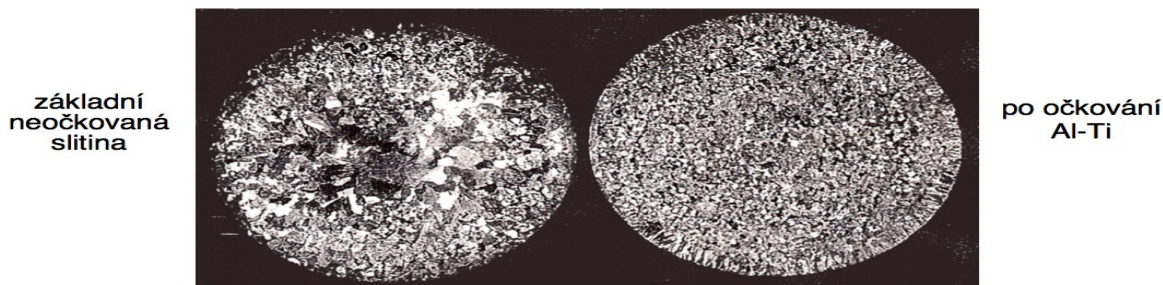
Disperzita primární fáze se vypočítá např. podle vztahu :

$$KF = 11,41 - 0,347 \cdot t_L + 0,66 (T_L - 550)$$



Obrázek 8 Vyhodnocení disperzity primárního zrna KF [3]

(Čím vyšší je číslo KF, tím získáváme jemnější strukturu. Na hodnoty v uvedeném vztahu má vliv použité zkušební zařízení. Jako příklad zjemnění struktury očkovaním je uveden obr. 9) [3].



Obrázek 9 Vliv očkování na velikost zrna slitiny Al-Si7 [3]

### 5.2.2 Očkovací prostředky

**Očkovací slitiny** se nejčastěji dodávají jako tyčinky s danou velikostí (obvykle s rozměry  $\varnothing$  10 mm při délce asi 500 mm). Jejich dávkování je velmi jednoduché – množství očkovačla se předem určí a zadá se taviči jako počet tyčí na určitou hmotnost kovu. Očkovací účinek se dostavuje velice rychle a většinou lze odlévat ihned po naočkování.

**Očkovací soli** se většinou přidávají na hladinu taveniny v množství, které doporučuje výrobce (obvykle cca 1 %). Zvonem se sůl ponoří ke dnu lázně a promíchá se s taveninou. Je ale nezbytné aby byly soli dobře vysušené, jinak by se jimi do taveniny vnášela vlhkost [3].

### 5.2.3 Vliv očkování na vlastnosti slitin

Zjemnění zrna se projeví zlepšením mnoha mechanických i technologických vlastností:

- zvýšením tažnosti a pevnosti,
- snížením tendence slitiny ke vzniku trhlin,
- nižší pórovitosti odlitků,
- zvýšením těsnosti odlitků,
- lepší obrobiteľnost,
- dosažení kvalitnějšího povrchu po anodické oxidaci,
- lepší vlastnosti po tepelném zpracování

Bezmála všechny tyto účinky jsou spojeny se zvýšením strukturní a chemické homogenity a s menším počtem segregací jednotlivých prvků. Snížení náchylnosti ke vzniku trhlin bylo detailně zkoumáno u slitin Al-Cu. Za významný účinek je považováno, že pevnost vznikající tuhé fáze v očkované slitině pod teplotou krystalizace vzrůstá rychleji, než ve slitině neočkované. Zjemnění zrna má vliv na rozmístění staženin, respektive mikrostaženin, zatímco neočkované slitiny mají tendence tvořit spíše soustředěné staženiny nebo oblasti s vysokou koncentrací ředin. Ve slitinách, které byly očkovány, se spíše tvoří rozptýlené mikrostaženiny a řediny, které jsou poměrně rovnoměrně rozloženy v celém objemu kovu. [3].

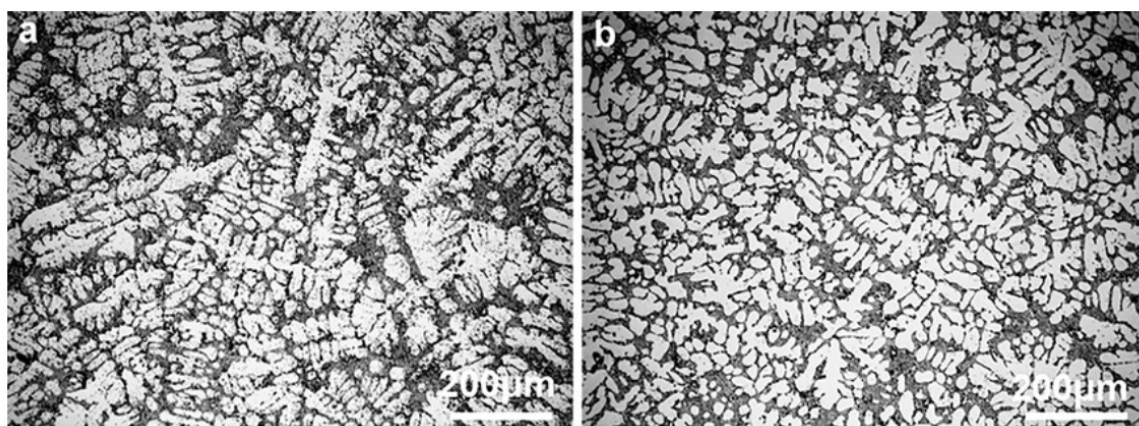
## 5.3 Očkování slitiny AlSi9Mg0,45 předslitinami AlTi5B1 a AlTi3B3

Následující série obrázků a grafů rozebírá detailněji vliv očkovacích příměsí na rozptýlení a velikost zrna u slitiny AlSi9Mg0,45. Například u obrázků 10 a 11 je patrné, že předslitina AlTi3B3 vytváří značně menší velikost zrn a tím i jemnější strukturu [6, 9].

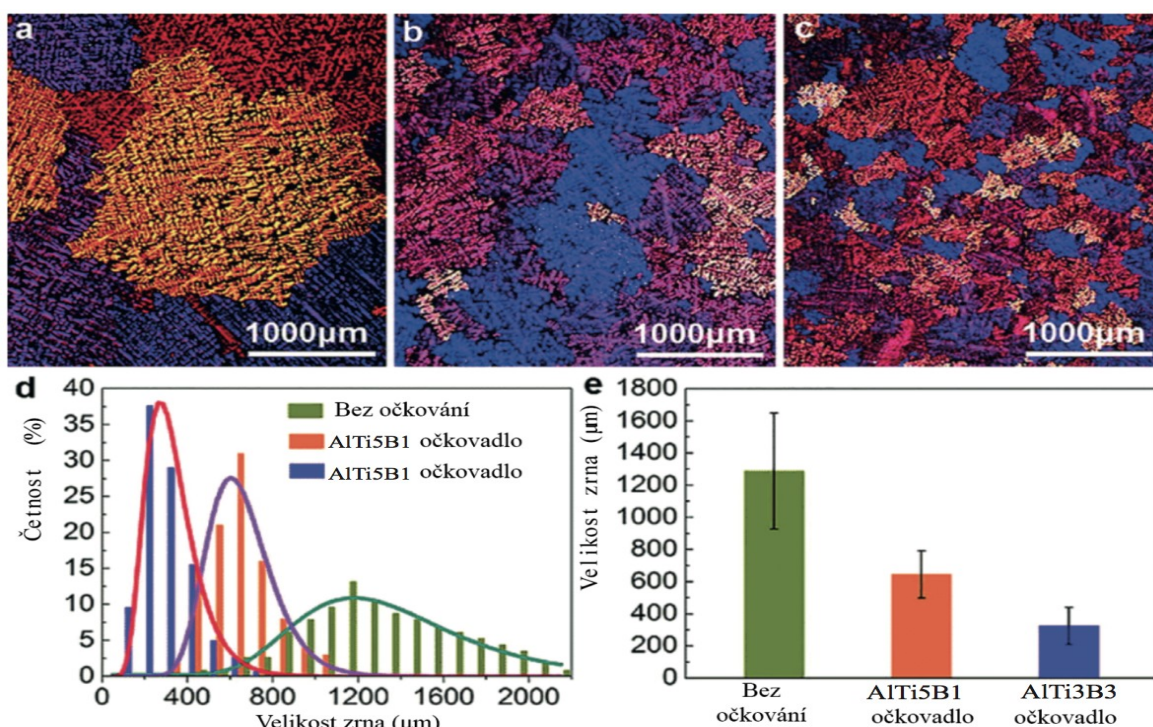


**Obrázek 10** Optické mikrofotografie ukazující morfologii slitin  $\text{AlSi9Mg0,45}$ , které byly očkovány předslitinami (a)  $\text{AlTi5B1}$  a (b)  $\text{AlTi3B3}$  [6].

**Obrázek 11** Polarizované optické mikrofotografie ukazující velikost zrn primární  $\alpha\text{-Al}$  fáze ve slitinách  $\text{AlSi9Mg0,45}$ , které nebyly očkovány (a) a dále s očkováním předslitinami (b)  $\text{AlTi5B1}$  a (c)  $\text{AlTi3B3}$ . Grafy níže poukazují na: (d) Statistickou distribuci velikosti zrna a (e) statistickou průměrnou velikost zrna [6].



Obrázek 10 Morfologie předslitin (a)  $\text{AlTi5B1}$  a (b)  $\text{AlTi3B3}$  [6]



Obrázek 11 Polarizované mikrofotografie [6]

## 5.4 Modifikace eutektika slitin Al-Si

Mezi prvky, které mají modifikační účinek pro slévárenské slitiny Al-Si patří zejména sodík a stroncium. Modifikací se mírně navyšují pevnostní vlastnosti, avšak velmi výrazně zlepšují vlastnosti plastické, jako například tažnost a houževnatost. Běžné slitiny dosahují tažnosti 2-3%, ty modifikované až 8%. [3].

### 5.4.1 Modifikace stronciem

**Stroncium má menší účinnost modifikace než sodík, je ale daleko méně reaktivní, proto poskytuje daleko delší modifikační účinek při vysokém a stabilním využití [3].**

Do taveniny se vnáší nejčastěji ve formě předslitiny s hliníkem (s obsahem Sr obvykle 3,5-10%, výjimečně se užívá předslitin s obsahem Sr až 90% pro slitiny s nízkou lící teplotou, jelikož s klesající teplotou taveniny se stroncium rozpouští hůře a trvalo by velmi dlouho než by se z klasické předslitiny dosáhlo požadovaného obsahu Sr v tavenině). Předslitiny obsahují stroncium ve formě částic  $\text{SrAl}_4$ , které se v tavenině rozpadají a reagují s křemíkem za vzniku  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ . Tato sloučenina se dále rozkládá a uvolňuje se z ní Sr v čisté podobě, které, v souladu s teorií o povrchově aktivních modifikačních prvcích, upravuje strukturu eutektického křemíku do příznivého tvaru tenkých trubiček [3, 5].

Náběh modifikačního účinku je podstatně pomalejší než při užití přípravků se sodíkem („inkubační perioda“ trvá cca 5-10 min, ale efekt modifikace se i poté dalších několik desítek minut stále zlepšuje). Pro urychlení je výhodné, když dochází k pohybu taveniny (např. indukčním mícháním nebo občasným mechanickým promícháním). Odeznívání je naopak velmi pomalé a dochází k němu spíše oxidací než vypařováním z hladiny (jak je tomu u sodíku). Uvádí se, že dostatečný modifikační účinek má stroncium vtavenině běžně 3 až 6 hodin a částečně vydrží ve slitině i po přetavení (někdy se dodávají housky už v modifikovaném stavu pomocí stroncia). Pokud je navíc do taveniny přidá beryllium (v obsahu od 0,05-0,2 %), tak se účinek modifikace prodlouží až na 10 hodin [3, 5, 12].

## 6 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN

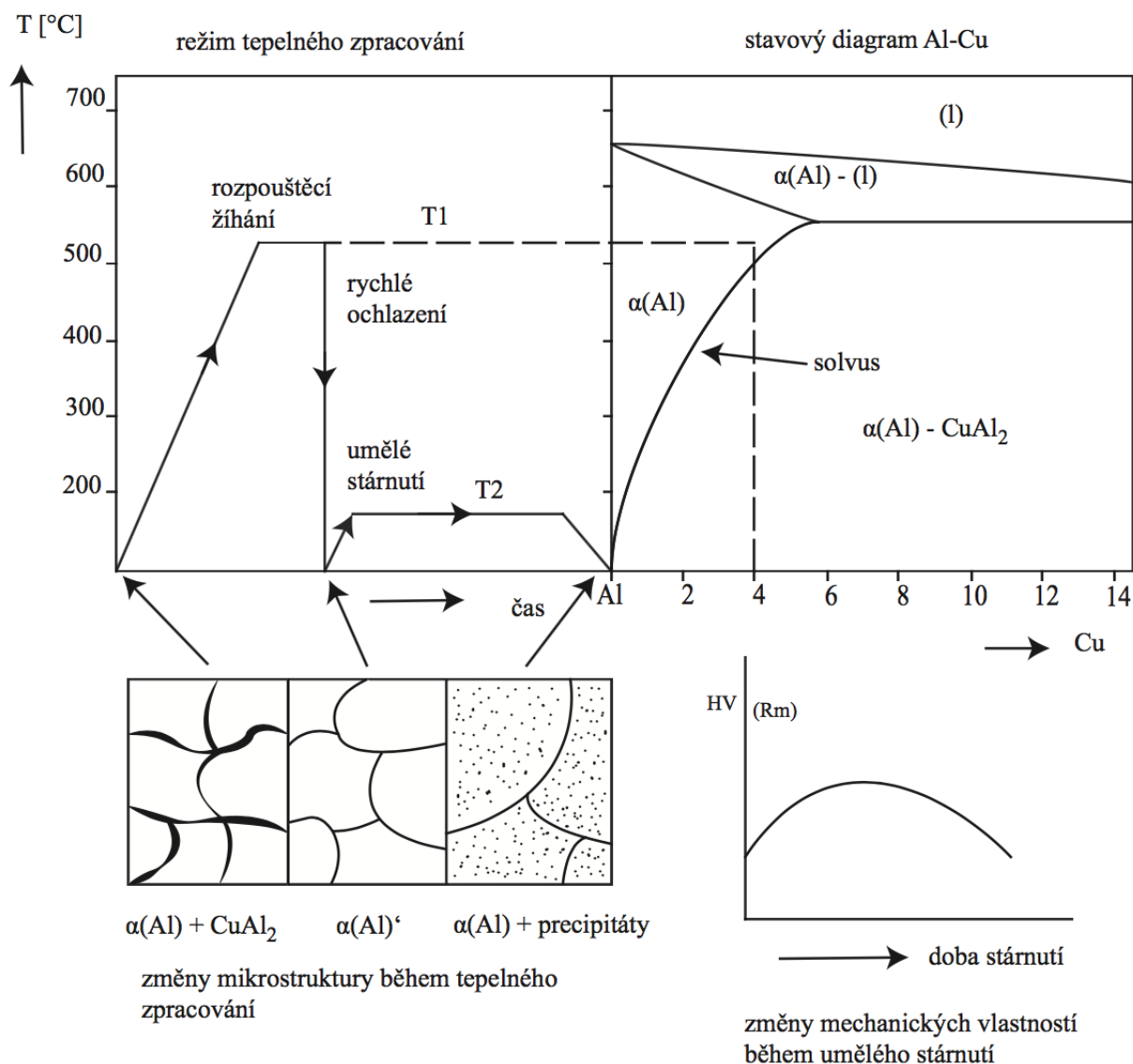
### 6.1 Definice, základní terminologie

Ve smyslu ČSN 42 0056 lze tepelné zpracování hliníku a jeho slitin definovat jako pochod, při kterém jsou výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury/substruktury a vlastností.

**Tepelným zpracováním** lze u některých slitin hliníku výrazně zlepšit hodnoty mechanických vlastností. **K vytvrzování jsou však vhodné pouze slitiny obsahující prvky, které vykazují v rovnovážném diagramu měnící se rozpustnost v tuhém stavu v závislosti na teplotě.** U slitin hliníku to platí pro ty, které obsahují přísadové prvky Cu, Mg, Si, Zn, Mn, tedy mezi vytvrditelné slitiny patří např. (AlCu, AlMgSi, AlMgZn) a mezi nevytvrditelné slitiny patří třeba (AlMg, AlMn). Princip pochodů při tepelném zpracování lze nejlépe demonstrovat na binárním diagramu Al-Cu na Obr. 12.

Po odlití odlitky tuhnou a jejich teplota klesá. Klesne-li teplota slitiny v tuhém stavu ke krystalizační křivce **solvus**, **opouští slitina oblast tuhého roztoku** a při dalším poklesu teploty se začnou vylučovat hrubé intermetalické částice  $\text{CuAl}_2$ , převážně po hranicích zrn. Odlitek má po zchladnutí mechanické hodnoty odpovídající litému stavu (F – viz tabulka č. 1). Čím pomaleji odlitek zchladnul, tím hrubší intermetalické fáze se v jeho struktuře vyloučily. Slitina je křehká, méně tažná a méně pevná. **Stejný mechanismus platí i pro slitiny AlSi, kde tuto roli přebírá intermetalická fáze  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .** Obsahuje-li siluminová slitina oba legovací prvky (Cu, Si), působí obě intermetalické fáze stejným způsobem [1, 4].

Jak již bylo uvedeno, k tomu aby bylo dosaženo vyšších hodnot mechanických vlastností a tím i lepších užitných hodnot odlitků, je možno provést vytvrzení. Jeho rozsah závisí na požadavcích, které jsou na odlitek kladeny. Popsán je postup úplného tepelného zpracování **T6**. Jelikož se jedná o energeticky náročný postup, je možno odlitek podrobit i různým zkráceným variantám tepelného zpracování [1, 4].



Obrázek 12 Princip tepelného zpracování na diagramu AlCu [1]

V **první fázi** vytvrzování (rozpouštěcího žhání), je odlitek ohřát do teploty blízké solidu s cílem zpětně dostat slitinu do tuhého roztoku a rozpustit zpětně v tomto roztoku hrubé segregáty vyloučené při tuhnutí. **Nejnámějšimi segregančními sloučeninami jsou  $\text{Mg}_2\text{Si}$  a  $\text{Al}_2\text{Cu}$ .** Každá slitina podle svého složení má empiricky stanovenou teplotu rozpouštěcího žhání. Teploty pro slitiny AlCu a AlSi se pohybují v rozmezí 480-540°C, doby setrvání na teplotě pro středně hmotné odlitky jsou kolem šesti hodin. Pro zaručení reprodukovatelnosti mechanických hodnot se musí přesně dodržovat teplota rozpouštěcího žhání. Tyto režimy se provádí převážně v elektrických odporových pecích s nucenou cirkulací vzduchu, teploty jsou udržovány v rozmezí  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Uvedené teploty a čas jsou vždy stanoveny jako kompromisy:

- pro co nejúplnější rozpuštění segregančních fází by byla vhodná co nejvyšší teplota blízko solidu a optimální čas výdrže na teplotě,

- vždy se však musí přihlídnout k deformační pevnosti odlitku při zvýšené teplotě a k tomu, aby v důsledku dlouhého času nezhrubla struktura.

**Cílem druhé fáze vytvrzování je zachytit nerovnovážený stav tuhého roztoku slitiny,** který se vytvořil v první fázi procesu. Toho se docílí prudkým zachlazením odlitků, převážně do studené nebo temperované vodní lázně. Čas od vyjmutí z pece do ponoření se musí pohybovat ve vteřinách. Konstrukční uspořádání peci je prováděno tak, aby se odlitky do lázně zvrhly nebo ponořily vysokorychlostním zdvihadním zařízením. Nejmodernější zařízení ponoří odlitky do tří vteřin.

**Třetím stupněm tohoto postupu tepelného zpracování je opětovné zahřátí a setrvání na precipitační teplotě (umělé stárnutí),** při níž se segregační složky vyloučí v jemné, mnohem výhodnější precipitační formě ( $Mg_2Si$ ,  $Al_2Cu$ ) zajišťující zlepšení mechanických hodnot. Precipitační (vytvrzovací) teploty se pohybují podle druhu slitiny v rozmezích 150-240°C.

**Uvedenými postupy lze zvýšit proti litému stavu pevnost v tahu  $R_m$  a mez kluzu  $R_{p0,2}$  až o 70 % a tvrdost o cca až 40 %.** Tepelné zpracování slitin hliníku je tedy proces, který zvýší užité hodnoty těchto materiálů. Je však třeba mít na paměti některé důležité zásady:

- jedná se o energeticky náročný proces a je třeba zvážit konstrukční opodstatněnost a ekonomickou nutnost těchto operací. Někdy se provádí jen částečné zušlechťení,
- v případě některých opravných operací zavařováním po tepelném zpracování je nutno proces opakovat, toto nelze opakovat několikrát, jelikož dochází k zhrubnutí základní struktury,
- tepelně zpracovat nelze odlitky lité pod tlakem, pokud do systému tlakového stroje nebyl zapojen vakuový ventil. Tlakový odlitek vyrobený bez použití tohoto zařízení má v sobě uzavřený vzduch, vniklý do prostoru formy společně se vstříkovaným materiálem, který při ohřevu expanduje na povrch odlitku,
- nejvyšší pozornost je třeba věnovat první fázi procesu. Překročení optimálních teplot má za následek změnu barvy povrchu (zešedne), deformaci tvaru, mezikrystalické vycezeniny nebo dokonce natavení odlitku, i proto musí být odlitky umístěné většinou v ocelových koších, pečlivě rovnány, případně podkládány [1].

## 6.2 Hodnoty mechanických vlastností hliníku a jeho slitin

Krystalová struktura hliníku je **kubicky plošně centrovaná**. Proto je čistý hliník měkký a tvárný. Aby jej bylo možno užívat jako konstrukčního materiálu je pro slévarenské účely legován Si, Cu, Mg, Ni a případně pro speciální účely i dalšími prvky. Typické mechanické hodnoty hliníku a jeho slitin jsou uvedeny v tabulce č. 1. [1]

*Tabulka 1 typické mechanické hodnoty Al a jeho slitin [1]*

Materiál/slitina	Stav	Pevnost v tahu R <sub>m</sub> (MPa min)	Smluvní mez kluzu R <sub>p0,2</sub> (MPa min)	Tažnost A <sub>50</sub> (min %)	Tvrdost (HB min)
Čistý hliník	0	70	20	30	20
AlSi7Mg	F	140-150	80	2	50
AlSi10Mg P/K		170-180	90	2,5	55
AlSi7Mg	T6	220-240	180-210	1-2	75-85
AlSi10Mg P/K		260	220	1-2	80-100
AlSi12	F	150	70	4-6	45-50
P/K		170	80	5-7	45-55
AlMg3-5	F	140	70	3	50-55
P/K		150-180	70-110	3-5	50-65
AlCu4Ti	T6	300	200	3-5	90-95
P/K		320-330	200-220	7-8	90-95

P – lité přímo do pískové formy,      Stav 0 – žíhaný,

K – lito do kovové formy,      Stav F – po odlití, bez tepelného zpracování,

Stav T6 – úplně tepelně zpracován.

## 7 METODA MĚŘENÍ TVRDOSTI PODLE BRINELLA

Jako indenter využívá Brinellova metoda ocelovou kuličku. Používané průměry jsou 1mm, 2,5mm, 5mm a 10mm. Průměr kuličky se volí tak, aby deformovaná oblast byla pouze ve zkoušeném vzorku. Pro splnění výše uvedené podmínky musí být nejmenší tloušťka materiálu minimálně osminásobek hloubky vtisku. Další kritérium pro volbu průměru kuličky je velikost zrna měřeného materiálu (je vhodné, aby kulička zasahovala do co největšího počtu zrn) [4].

Zátěž bývá v rozmezí 20 – 3 000 kg a volí se na základě vztahu:

$$F = KD^2$$

kdy koeficient  $K$  je volen podle testovaného materiálu:

ocel	$K = 30$
neželezné kovy a slitiny	$K = 10$
měkké neželezné kovy a kompozice	$K = 2,5$

**Měřicí cyklus sestává ze následujících kroků:**

1. výběr vhodného místa pro vtisk a najetí indenteru nad něj
2. postupné zatěžování indenteru na zvolenou nominální hodnotu zátěže
3. výdrž na zátěži (typicky u slitin železa 10 – 15s, u neželezných slitin 10 až 180s)
4. odlehčování indentoru a najetí objektivu pro měření nad vtisk
5. změření průměru vtisku a výpočet tvrdosti

**Vzorec pro výpočet tvrdosti podle Brinella je následující:**

$$HB = F/S$$

kdy je:

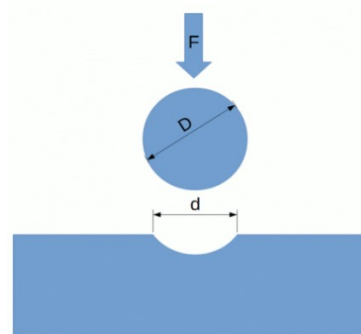
HB – označení tvrdosti podle Brinella

S – plocha [mm<sup>2</sup>] vytvořeného důlku z průměru vtisku

F – zatěžovací síla [kp] při znalosti průměru vtlačované kuličky[4]

Plocha S je získaná pomocí vzorce :

$$S = \pi D \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$



Obrázek 13 Schéma vtisku [4]



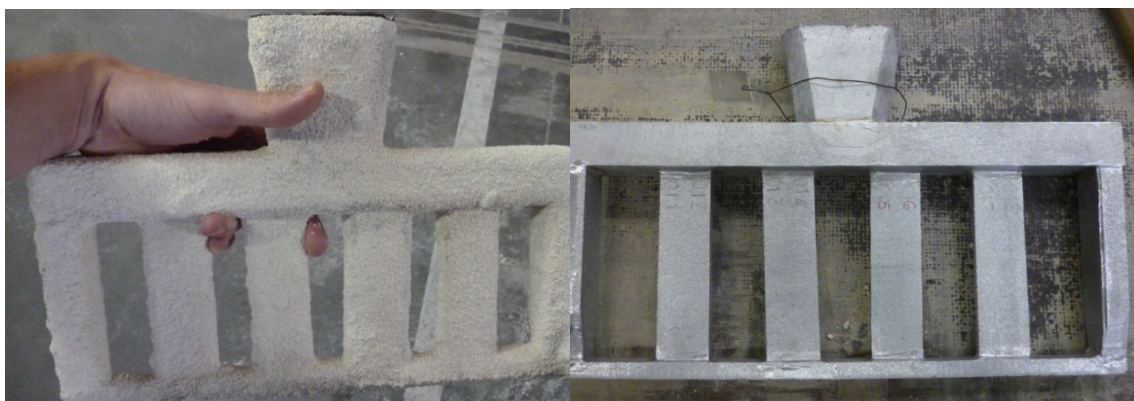
## 9 ZKUŠEBNÍ VZORKY

### 9.1 Slitina AlSi7Mg0,6

Zkušební destičky byly odlity ze slitiny AlSi7Mg0,6, která má hlavní legující prvky křemík a hořčík. Jedná se o slitinu s nejvyššími mechanickými vlastnostmi typu (Al-Si). Používá se pro odlitky s vysokými nároky na pevnost a houževnatost.

### 9.2 Experimentální vzorky

Vzorky byly odlity do keramické formy o 5ti vrstvách s vyžiháním na 700°C technologií vypařitelného polystyrenového modelu viz. obrázky č. 14 a 15 při lící teplotě 720°C firmou Alucast s.r.o. Slitina byla očkována tabletou Microsal Al a dále nemodifikována. Navzdory tomu slitina vykazuje modifikovanou strukturu, musela tedy být dodána jako předmodifikovaná stronciem. Tloušťky vzorků byly vybrány, aby odpovídaly tloušťkám stěn odlitků v praxi, a to celkově 16 kusů, 8 kusů o tloušťce 3 mm a dalších 8 kusů o tloušťce 10 mm.



Obrázek 14 Odlitek před a po odstranění skořepiny





*Obrázek 15 Vzorky připravené k tepelnému zpracování*

## 10 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ

Vzorky dodané k testování byly tepelně zpracovány metodou T6 firmou Alucast s.r.o, kdy hlavní rozdíl spočíval v délce tepelného zpracování, a to 3, 6, 9 a 12 hodin. Po tepelném zpracování byly vzorkům naměřeny hodnoty tvrdosti dle Brinella viz. kapitola 7. Další důležitější a touto prací zkoumaný bod je v rozdílu provedení tepelného zpracování. První série vzorků byla tepelně zpracována ihned po odlití, kdežto druhá totožná série až po 14 dnech skladování v pokojové teplotě. Časové a mechanické hodnoty ukazuje tabulka č. 2

### 10.1 Metoda tepelného zpracování T6

Jedná se o energeticky náročný postup, při kterém dochází k vytvrzování struktury, který lze rozdělit do tří hlavních fází:

- V první fázi (rozpuštěcí žíhání) je odlitek ohřát do teploty blízké solidu s cílem zpětně dostat slitinu do tuhého roztoku a rozpustit v tomto roztoku hrubé agregáty  $Mg_2Si$  vyloučené při tuhnutí.
- Cílem druhé fáze vytvrzování je zachytit nerovnovážený stav tuhého roztoku slitiny, který se vytvořil v první fázi procesu. Toho se docílí prudkým zachlazením odlitků do studené vodní lázně.
- Třetím stupněm tohoto postupu tepelného zpracování je opětovné zahřátí a setrvání na precipitační teplotě (umělé stárnutí), při níž se segregační složky vyloučí v jemné, mnohem výhodnější precipitační formě ( $Mg_2Si$ ) zajišťující zlepšení mechanických hodnot. Precipitační (vytvrzovací) teploty se pohybují v rozmezích 150-240°C.

Tabulka 2 Doba TZ a datum US + hodnoty tvrdosti HB

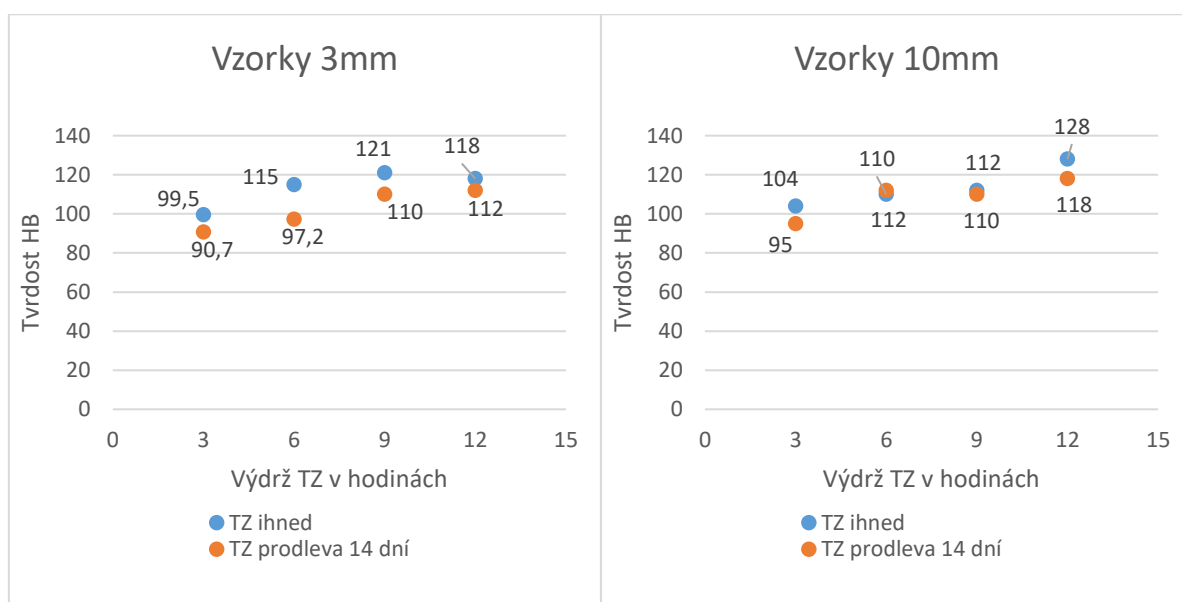
<b>Číslo vzorku</b>	<b>Výdrž TZ (hod)</b>	<b>Datum provedení TZ - US</b>	<b>Tloušťka vzorku (mm)</b>	<b>Tvrdość (HB)</b>
<b>0 11</b>	3	13.12.17	10	104
<b>0 15</b>	3	13.12.17	3	99,5
<b>0 12</b>	3	02.01.18	10	95
<b>0 16</b>	3	02.01.18	3	90,7
<b>0 21</b>	6	14.12.17	10	110
<b>0 25</b>	6	14.12.17	3	115
<b>0 22</b>	6	02.01.18	10	112
<b>0 26</b>	6	02.01.18	3	97,2
<b>0 43</b>	9	15.12.17	3	121
<b>0 47</b>	9	15.12.17	10	112
<b>0 44</b>	9	03.01.18	3	110
<b>0 48</b>	9	03.01.18	10	110
<b>0 63</b>	12	16.12.17	10	128
<b>0 67</b>	12	16.12.17	3	118
<b>0 64</b>	12	04.01.18	10	118
<b>0 68</b>	12	04.01.18	3	112

## 11 ZÁVISLOST TVRDOSTI NA TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, rozdílnost tepelného zpracování (dále již TZ) nespočívala pouze v počtu hodin vystavených odlitků TZ, ale i v počtu dnů, po kterých bylo TZ vykonáno.

### 11.1 Vyhodnocení vzorků podle tloušťky stěn a hodin vystavených TZ

Tato kapitola znázorňuje vliv na tloušťku materiálu a jeho závislosti na tvrdost při jednotlivých časových intervalech TZ. Následující grafy tvrdosti (obr. 16) znázorňují rozdíl v hodnotách HB a výdrži v hodinách na TZ pro dvě série vzorků, a to s TZ ihned po odlití a s 14ti denní prodlevou.



Obrázek 16 grafy tvrdosti HB

Na první pohled jsou vidět vyšší mechanické hodnoty u první série, zvláště u vzorků o tloušťce 3 mm. Lze tedy vycházet z toho, že tloušťka stěny materiálu do jisté míry může rozhodovat o stanovení nejzazší doby, do které se musí odlitek tepelně zpracovat, aby nedošlo k příliš velkému úbytku na tvrdosti.

## 12 METALOGRAFICKÉ VÝBRUSY

K analýze mikrostruktury bylo nutno si nejprve připravit povrch vzorků sérií brusných a leštících procesů. Broušení probíhalo za mokra na brusných papírech o zrnitosti 600, 800, 1200 a 2500 na strojích metasinex.



*Obrázek 17 Stroj metasinex*

Po vybroušení na požadovanou drsnost následovalo leštění oxidem hlinitým, čímž se získala pod mikroskopem viditelná struktura, která ovšem stále obsahovala jemné rýhy po broušení, a proto byly vzorky podrobeny ještě chemickému leštění oxidem křemičitým OP-S, značky Struers. Tím vzorky získaly dokonalý povrch bez viditelných stop po broušení.





*Obrázek 18 Stroje na leštění oxidem hlinitým a křemičitým*

Vyleštěné vzorky (obr.19) byly zkontrolovány a nafoceny inverzním mikroskopem značky Olympus, model GX51 ve dvou variantách, a to ve zvětšení 100x a 500x.



*Obrázek 19 Vyleštěné vzorky připraveny k nafocení*

## 12.1 Porovnání vzorků 3mm a 10mm

Na základě důkladného prozkoumání všech 16ti vzorků jsem došel k závěru, že nejde jednoznačně určit vazbu mezi strukturou a tvrdostí HB, protože na výslednou strukturu má vliv hned řada faktorů. Je možné viditelně rozpoznat jemnější strukturu u vzorků s tloušťkou stěny 3 mm, a to jak velikost dendritů  $\alpha(\text{Al})$ , tak rozptýlení eutektika  $\alpha(\text{Al})\text{-Si}$ . Naopak u vzorků s tloušťkou stěny 10 mm lze pozorovat velké dendritické plochy.

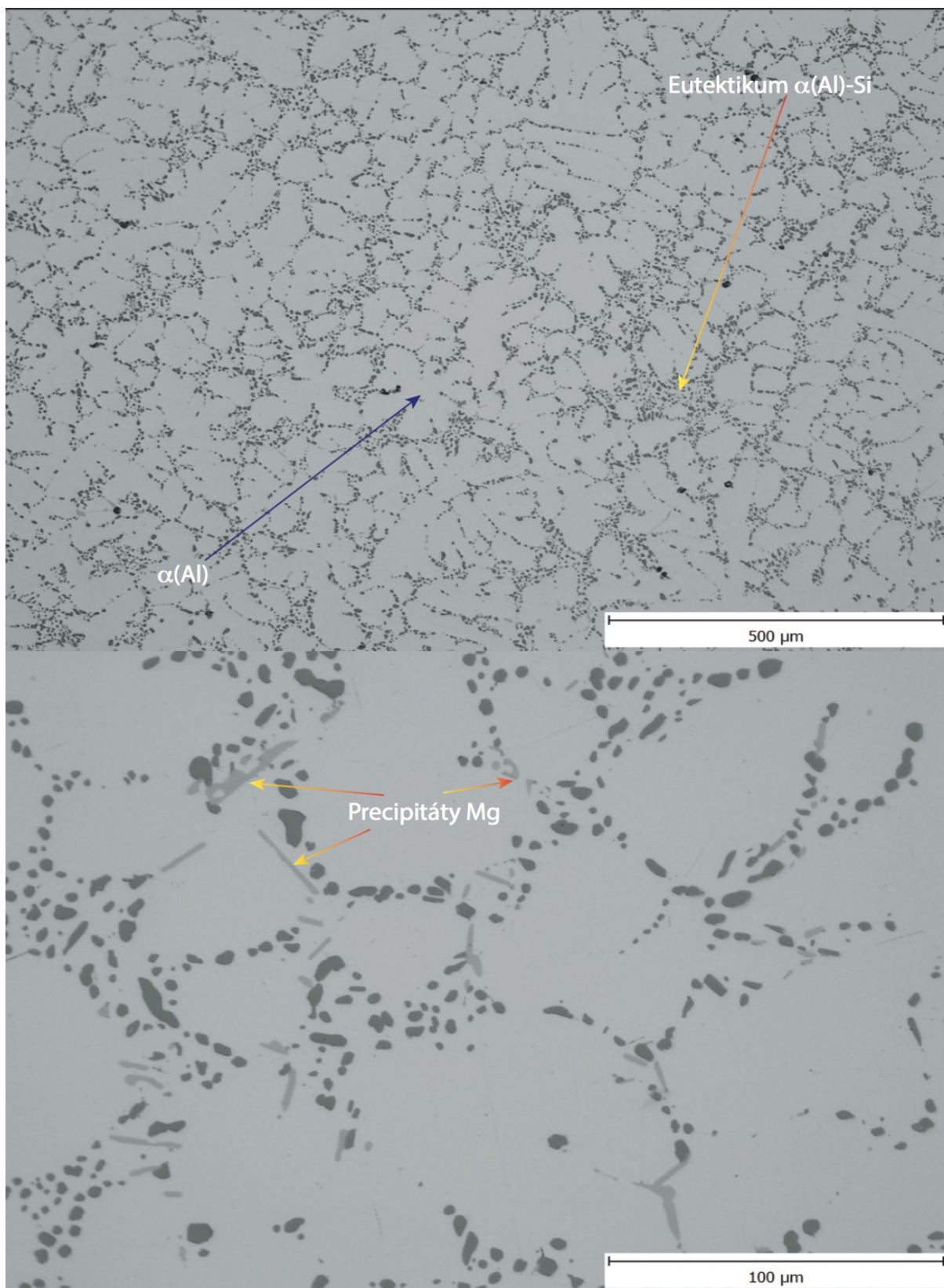
Výdrž na teplotě při tepelném zpracování má vliv na mechanické vlastnosti. U zkoušek tvrdosti byl pozorován nárůst zhruba 10%, ale na strukturálních vlastnostech změnu nelze pozorovat z toho důvodu, že snímky byly pořízeny na různých částech vzorků. Části, které byly v blízkosti styku tekutého kovu s formou, budou mít vždy jemnější strukturu než části středové, a to z důvodu rychlejšího ochlazování. Proto jsem vybral následující sérii čtyř obrázků, které mi připadaly nejzajímavější a na kterých bude vyhodnocena struktura vzorků. Pro orientaci v obrázcích je níže uvedena tabulka číslo 3. Ostatní obrázky jsou zahrnuty v příloze.

První dva obrázky popisují strukturu vzorku o tloušťce stěny 3 mm. Můžeme pozorovat výrazně jemnější strukturu dendritů a řídké eutektické fáze.

Druhé dva obrázky popisují strukturu vzorků o tloušťce stěny 10 mm, struktura dendritů je v porovnání s 3 mm vzorky mnohem větší a tvarem připomíná vlašské ořechy.

*Tabulka 3 Orientační tabulka pro obrázky (20, 21, 22, 23)*

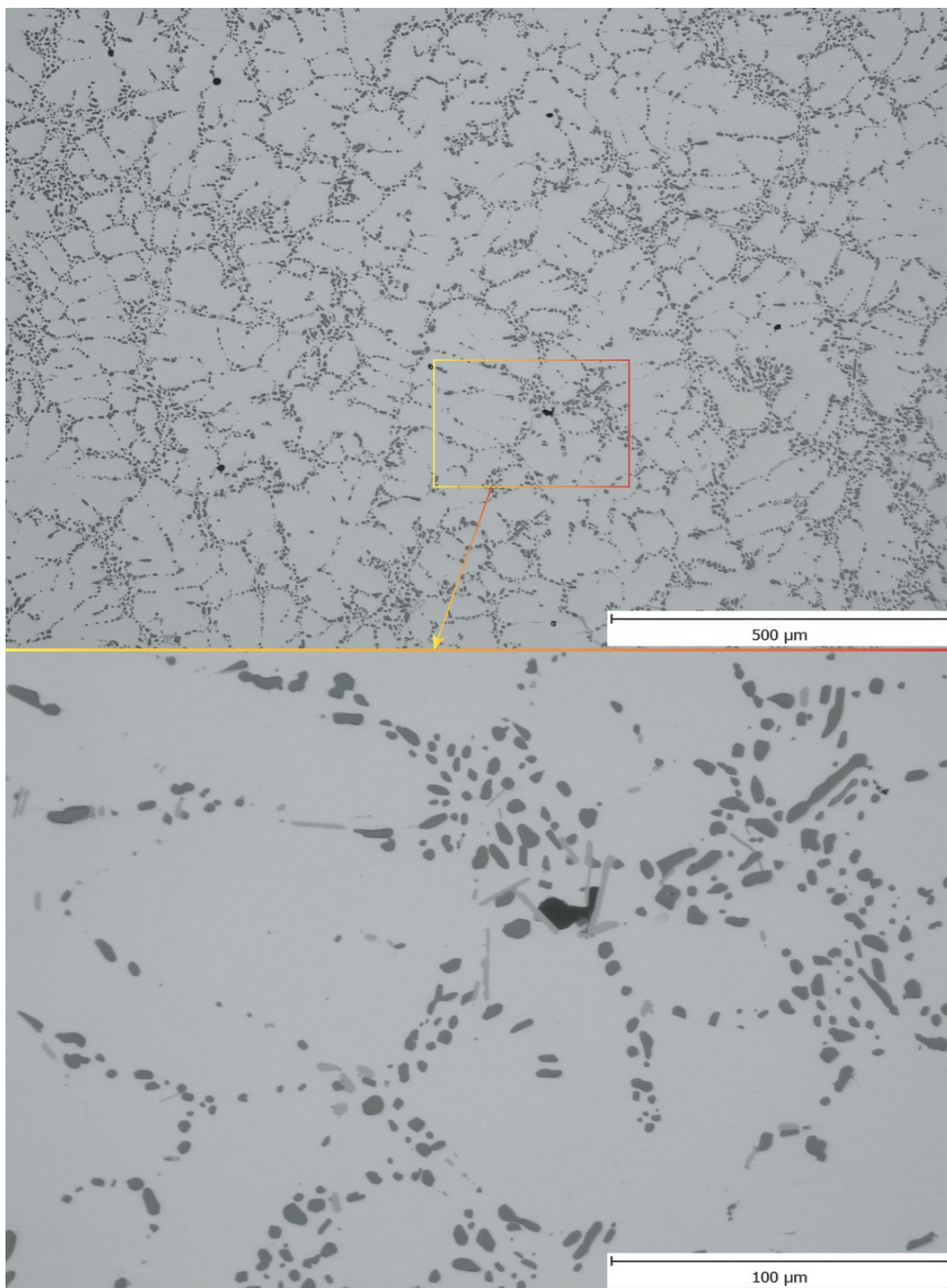
Číslo obrázku	Číslo vzorku	Výdrž TZ (hod)	Datum provedení TZ - US	Tloušťka vzorku (mm)	Tvrdost (HB)
20	0 15	3	13.12.17	3	99,5
21	0 43	9	15.12.17	3	121
22	0 47	9	15.12.17	10	112
23	0 48	9	03.01.18	10	110



Obrázek 20 vzorek č. 0 15

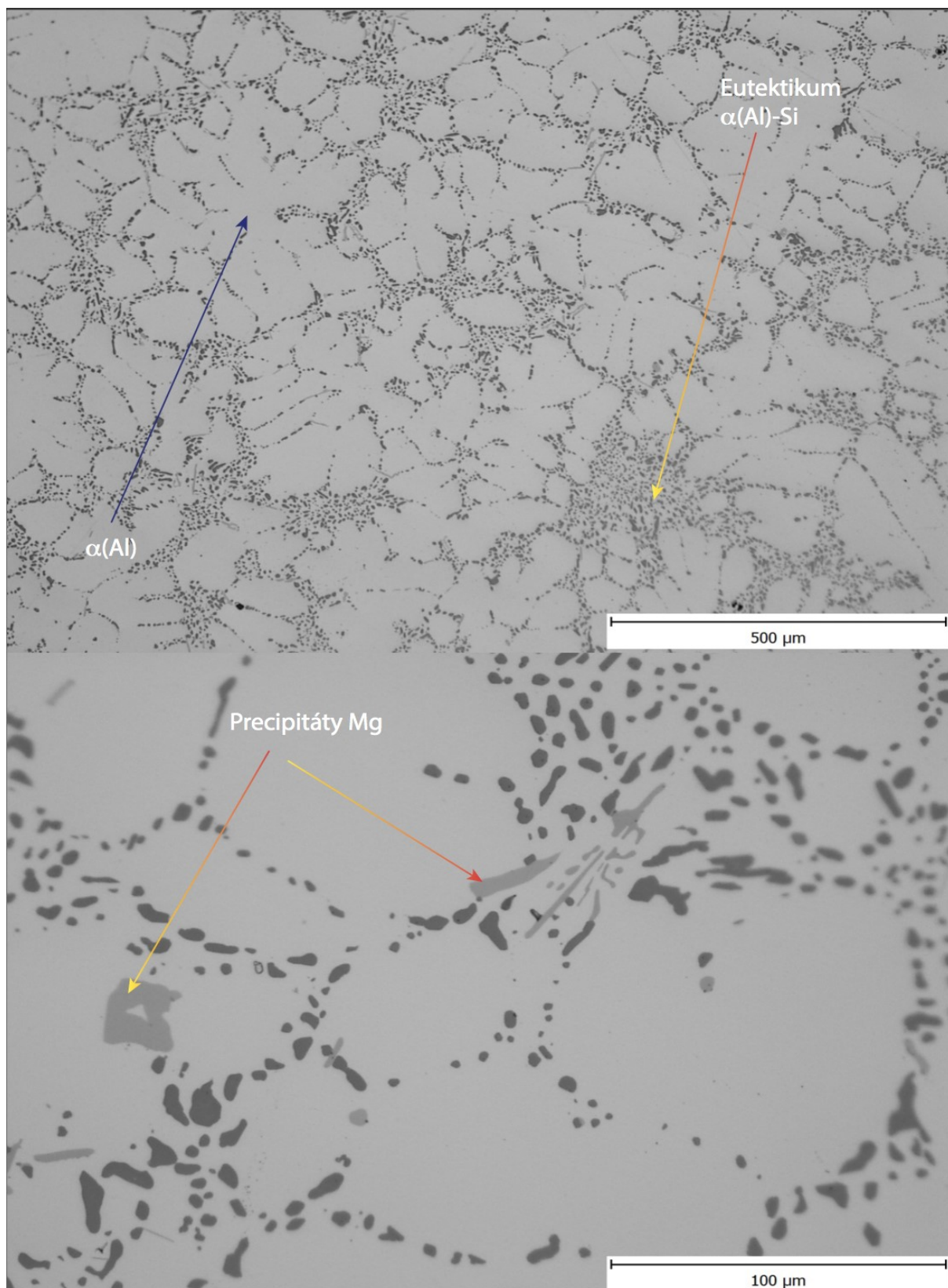
Vzorek č. 0 15 vykazuje jemnou mikrostrukturu u obou fází. U hořčíkových precipitátů se objevují spíše ostré a ploché tvary. Vyloučený křemík má tvary oválné a kulaté.





Obrázek 21 vzorek č. 043

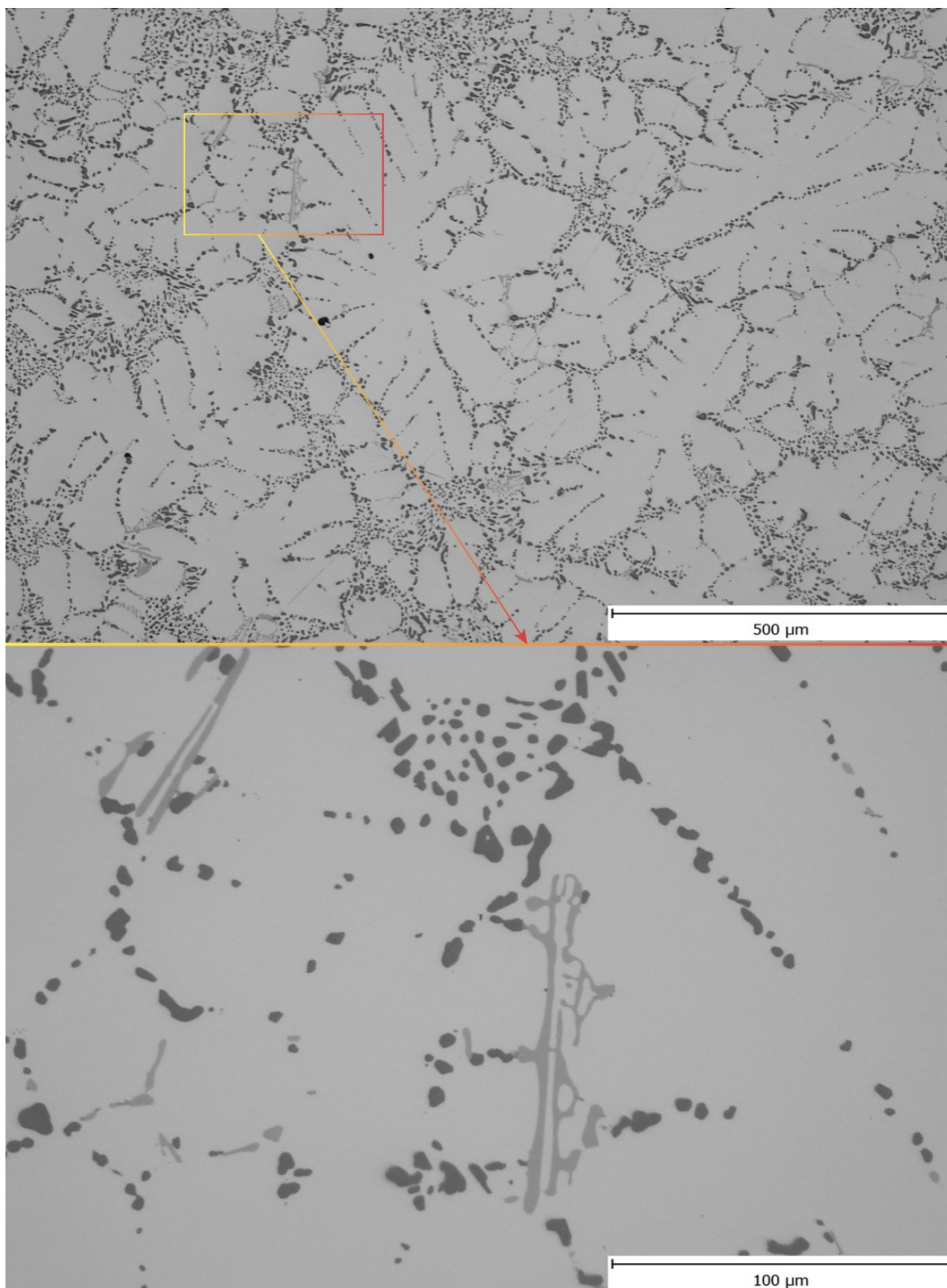
Zajímavostí u vzorků s tloušťkou stěn 3 mm a tudíž jemnější strukturou je, že se precipitáty hořčíku mají tendenci srážet na povrchu ředin.



Obrázek 22 vzorek č. 0 47

Struktura u vzorků s tloušťkou stěn 10 mm vytváří viditelně větší dendritické plochy a lze pozorovat, že eutektické fáze jsou v některých oblastech mnohem hustší, a tudíž struktura není tak homogenně rozptýlena jak u vzorků s tloušťkou stěn 3 mm.





Obrázek 23 vzorek č. 0 48

Na vzorcích s tloušťkou stěn 10 mm lze pozorovat, že hořčíkové precipitáty vytváří větší a složitější útvary. Nedošlo tudíž k tak dokonalému rozpuštění jak u vzorků s tloušťkou stěn 3 mm.

## 13 ZÁVĚR

Podstatou této bakalářské práce bylo objasnit technologické pochody, které ovlivňují mikrostrukturu odlitků z hliníkových slitin a spojitosti mezi mikrostrukturou a mechanickými vlastnostmi. V prvních kapitolách práce pojednávám o oblastech použití hliníkových slitin v průmyslu a jejich vlastnostech. V dalších kapitolách v teoretické části rozebírám faktory, které ovlivňují mikrostrukturu slitin a tím i jejich mechanické a technologické vlastnosti, jako například nukleaci zárodků, rychlost ochlazování či očkování slitin. V poslední části, však pro následující praktickou část nejvíce důležité, jsem se zaměřil na vliv a možnosti tepelného zpracování vytvrditelných slitin.

V praktické části jsem se věnoval analýze mikrostruktury pomocí světelné mikroskopie a jejího vlivu na mechanické vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,6 pro firmu Alucast s.r.o. Po pečlivém přezkoumání veškerých vzorků jsem došel k závěru, že ve výsledných metalografických výbrusech nelze najít určitou spojitost s mechanickými vlastnostmi, a to z následujících důvodů: Snímky, které byly na vzorcích pořízeny se vždy snažily zachytit co nejvhodnější místo ke zkoumání. Vzhledem k tomu, že snímky nebyly vždy pořizovány ve středové části vzorku, byl jejich povrch vystaven rychlejšímu ochlazování ze stěn formy, a tak docházelo k nehomogennímu ochlazování, jehož výsledkem je mnohem jemnější struktura u povrchu vzorků a hrubší struktura ve středové části. Obecně se má zato, že čím jemnější struktura, tím lepší mechanické vlastnosti. Vycházet jsem mohl pouze z dodaných mechanických hodnot tvrdosti HB, které tento pojem vyvrací, protože vzorky se stěnou 3 mm mají výrazně jemnější strukturu a přitom u nich byly naměřeny nižší hodnoty tvrdosti. Pro přesné vyhodnocení vazby mezi strukturou a mechanickými vlastnostmi bych musel mít prostor ke kompletním mechanickým zkouškám, které bych rád provedl například v diplomové práci. Dalším zkoumaným faktorem bylo riziko odložení tepelného zpracování, které může vést ke ztrátě mechanických vlastností. U vzorků byl proveden 14ti denní odstup, který prokázal úbytek tvrdosti HB o 8 až 10%.

Ve výsledném zhodnocení bych chtěl poukázat na to, že u vzorků s jemnější strukturou dochází k segregaci hořčíkových precipitátů, které jsou rozptýleny v jemnější formě, a proto se shlukují na povrchu dusíkových ředin. Právě to může být jedním z faktorů, který ovlivňuje mechanické vlastnosti.

Práce se siluminy, speciálně pro letecký nebo automobilový průmysl, mě velmi bavila a chtěl bych se jí věnovat i nadále buď na škole či v zaměstnání.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NĚMEC, M; PROVAZNÍK, J. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. 1. Vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [2] MICHNA, Š; KUŠMIERCAK, S. *Technologie a zpracování hliníkových materiálů*. 1. vyd. V Ústí nad Labem: Fakulta výrobních technologií a managementu, Univerzita J.E. Purkyně, 2008. ISBN 9788070449981.
- [3] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [4] *Tepelné zpracování*, poslední revize 1.1.2018. Dostupné z: [www.alunet.cz/tepelne-zpracovani](http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani)
- [5] MICHNA, Š., LUKÁČ, I. a OČENÁŠEK, V. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Prešov, 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [6] DONG, X; ZHANG, Y; JI, S. *Enhancement of mechanical properties in high silicon gravity cast AlSi9Mg alloy refined by Al3Ti3B master alloy*. [online]. Jun 2017. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [7] VICEN, M; FABIAN, P; TILLOVA, E. *Selfhardening AlZn10Si8Mg aluminium alloys as an alternative replacement for AlSi7Mg0,3 aluminium*. [online]. September 2017. Dostupné z :<https://www.researchgate.net>
- [8] EDUARD, D. *Nauka o materiálu III*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické 1979. 174s
- [9] DONG, X; JI, S. *Si poisoning and promotion on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg cast alloys*. [online]. October 2017. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [10] MACHUTA, J; NOVÁ, I. *Structure and mechanical properties of aluminium alloys AlSi10 and AlSi5Mg*. [online]. October 2017. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [11] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1.

- [12] PEŠEK, J. *Studium vlivu metalurgických a technologických parametrů na mechanické vlastnosti slitin hliníku* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/23609>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ladislav Zemčík.
- [13] JANOŠŤÁK, J. *Vliv modifikace a očkování na strukturu a mechanické vlastnosti slitin hliníku* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33909>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$A_5$  – tažnost [%]

$A_{50}$  – tažnost [%]

$R_e$  – mez kluzu [MPa]

$R_{p0,2}$  – smluvní mez kluzu [MPa]

$R_m$  – mez pevnosti [MPa]

$F$  – síla [N]

HB – tvrdost dle brinella

hm. % - hmotnostní procenta

ppm – Part Per Milion [ $10^{-4}$ ]

$\alpha(\text{Al})$  – tuhý roztok křemíku v hliníku

$\Theta$  – kontaktní úhel

$S$  – plocha [ $\text{mm}^2$ ]

US – umělé stárnutí

RŽ – rozpouštěcí žihání

TZ – tepelné zpracování

DAS – parametr disperzity dendritů

## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Slitina Al-Si9 po vytvrzení [3].....	7
Obrázek 2 Rovnovážný diagram Al-Si [3].....	9
Obrázek 3 popisující jednotlivé fáze diagramu Al-Si [3].....	9
Obrázek 4 smáčivost tuhnoucí fáze a krystalizačního zárodku [3].....	10
Obrázek 5 aktivační energie pro nukleaci aktivních zárodků a vliv přechlazení na jejich počet [3].....	11
Obrázek 6 Rovnovážná diagram Al-Ti [3] .....	12
Obrázek 7 Tvorba zárodků TiAl3 při peritektické reakci v systému Al-Ti [3].....	13
Obrázek 8 Vyhodnocení disperzity primárního zrna KF [3] .....	14
Obrázek 9 Vliv očkování na velikost zrna slitiny Al-Si7 [3] .....	14
Obrázek 10 Morfologie předslitin (a) AlTi5B1 a (b) AlTi3B3 [6] .....	16
Obrázek 11 Polarizované mikrofotografie [6] .....	16
Obrázek 12 Princip tepelného zpracování na diagramu AlCu [1].....	19
Obrázek 13 Schéma vtisku [4] .....	22
Obrázek 14 Odlitek před a po odstranění skořepiny.....	23
Obrázek 15 Vzorky připravené k tepelnému zpracování .....	24
Obrázek 16 grafy tvrdosti HB.....	27
Obrázek 17 Stroj metaxinex .....	28
Obrázek 18 Stroje na leštění oxidem hlinitým a křemičitým .....	29
Obrázek 19 Vyleštěné vzorky připraveny k nafocení .....	29
Obrázek 20 vzorek č. 0 15.....	31
Obrázek 21 vzorek č. 043.....	32
Obrázek 22 vzorek č. 0 47.....	33
Obrázek 23 vzorek č. 0 48.....	34



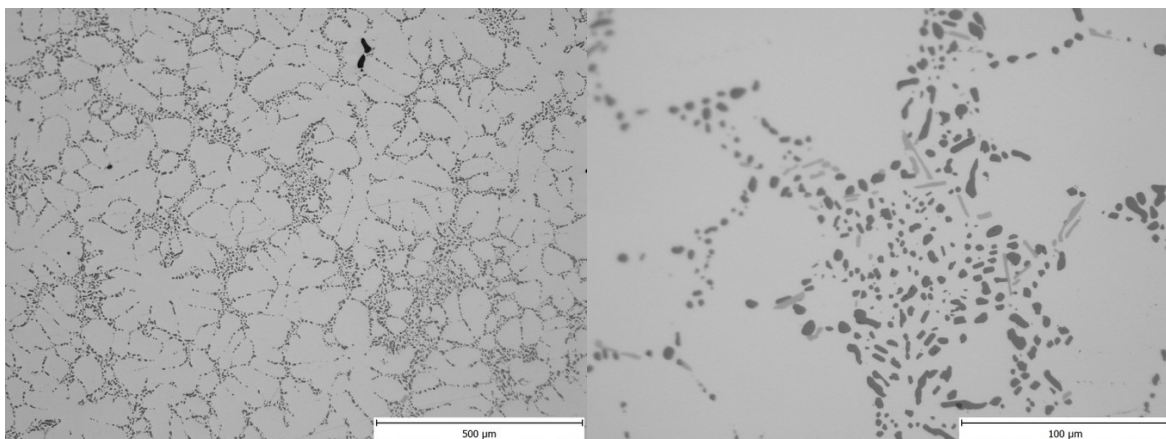
## SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 typické mechanické hodnoty Al a jeho slitin [1] .....	21
Tabulka 2 Doba TZ a datum US + hodnoty tvrdosti HB .....	26
Tabulka 3 Orientační tabulka pro obrázky (20, 21, 22, 23) .....	30
Tabulka 4 Tab. pro orientaci mezi vzorky .....	41

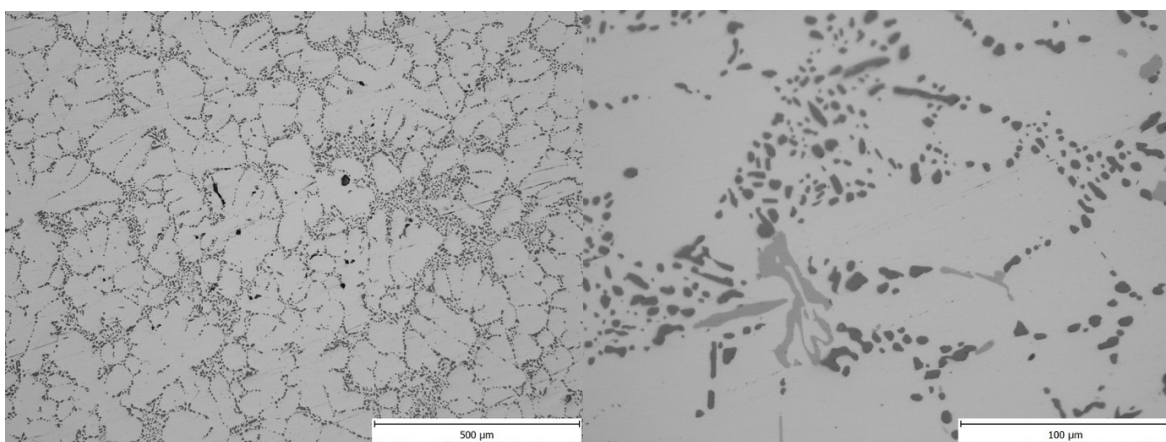
# PŘÍLOHA 1

Tabulka 4 Tab. pro orientaci mezi vzorky

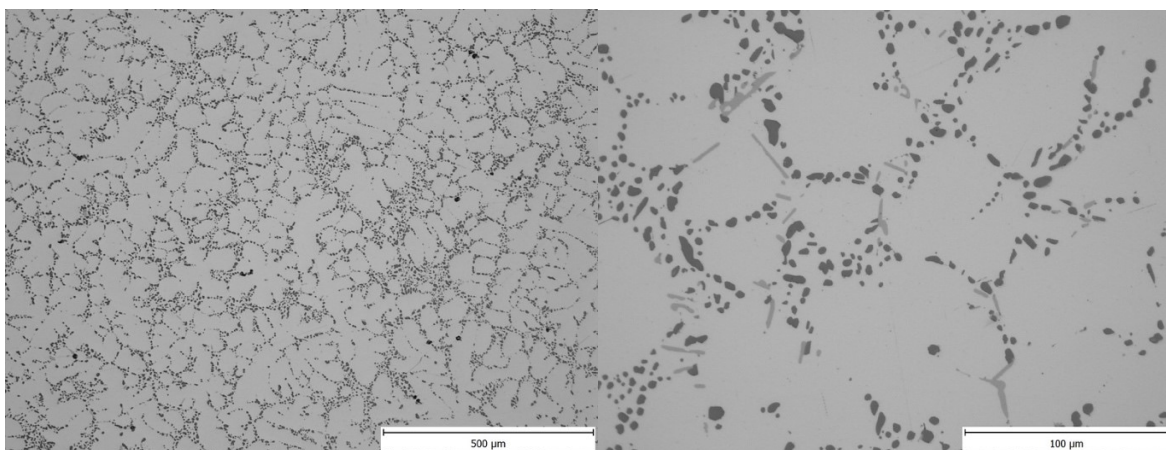
<b>Číslo vzorku</b>	<b>Výdrž TZ (hod)</b>	<b>Datum provedení TZ - US</b>	<b>Tloušťka vzorku (mm)</b>	<b>Tvrdost (HB)</b>
<b>0 11</b>	3	13.12.17	10	104
<b>0 15</b>	3	13.12.17	3	99,5
<b>0 12</b>	3	02.01.18	10	95
<b>0 16</b>	3	02.01.18	3	90,7
<b>0 21</b>	6	14.12.17	10	110
<b>0 25</b>	6	14.12.17	3	115
<b>0 22</b>	6	02.01.18	10	112
<b>0 26</b>	6	02.01.18	3	97,2
<b>0 43</b>	9	15.12.17	3	121
<b>0 47</b>	9	15.12.17	10	112
<b>0 44</b>	9	03.01.18	3	110
<b>0 48</b>	9	03.01.18	10	110
<b>0 63</b>	12	16.12.17	10	128
<b>0 67</b>	12	16.12.17	3	118
<b>0 64</b>	12	04.01.18	10	118
<b>0 68</b>	12	04.01.18	3	112



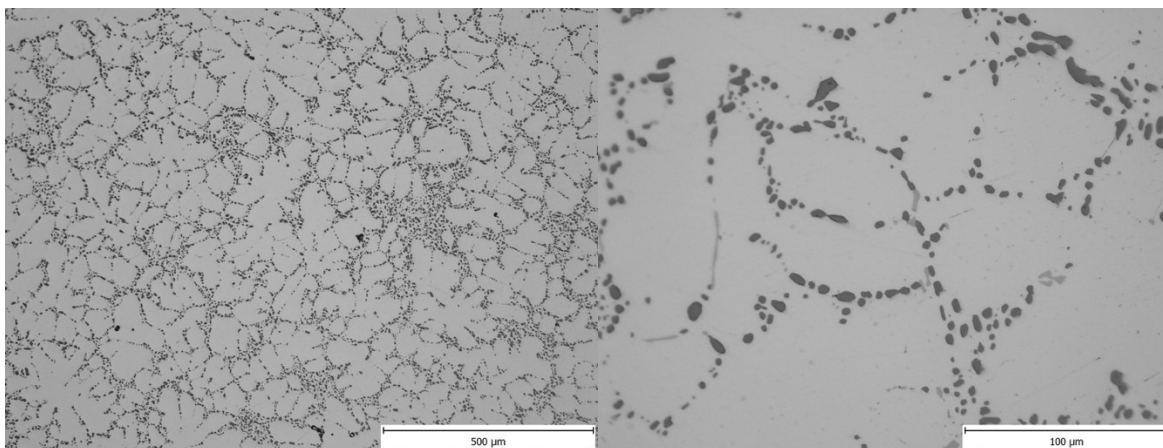
Vzorek 0 11 (100x a 500x zvětšení)



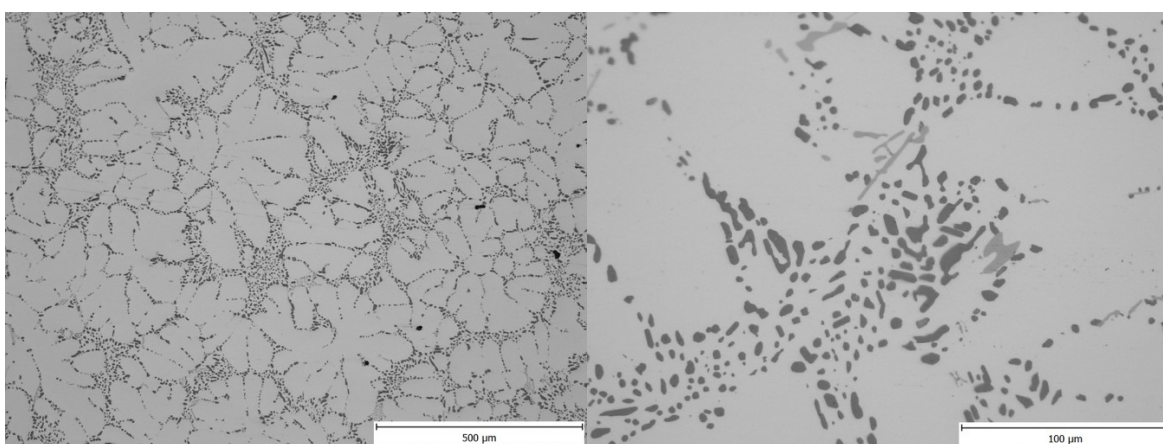
Vzorek 0 12 (100x a 500x zvětšení)



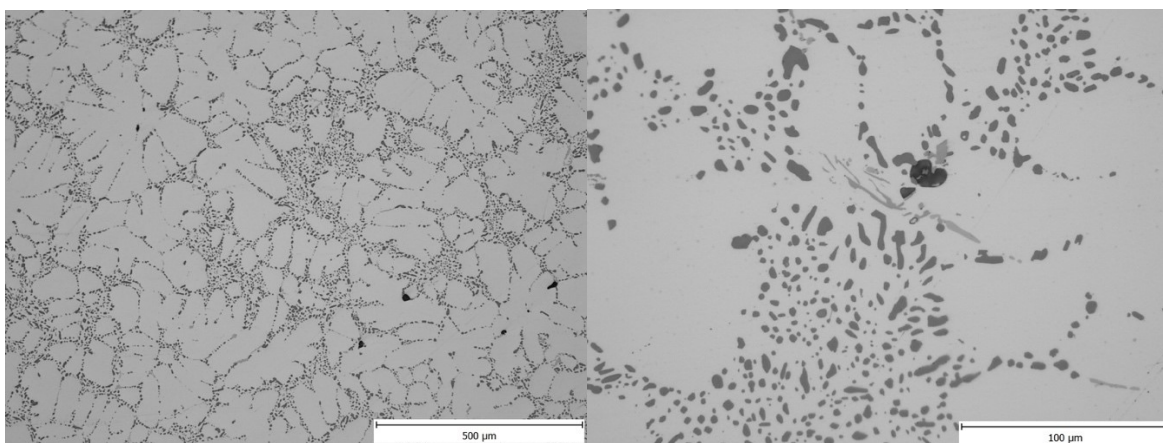
Vzorek 0 15 (100x a 500x zvětšení)



Vzorek 0 16 (100x a 500x zvětšení)

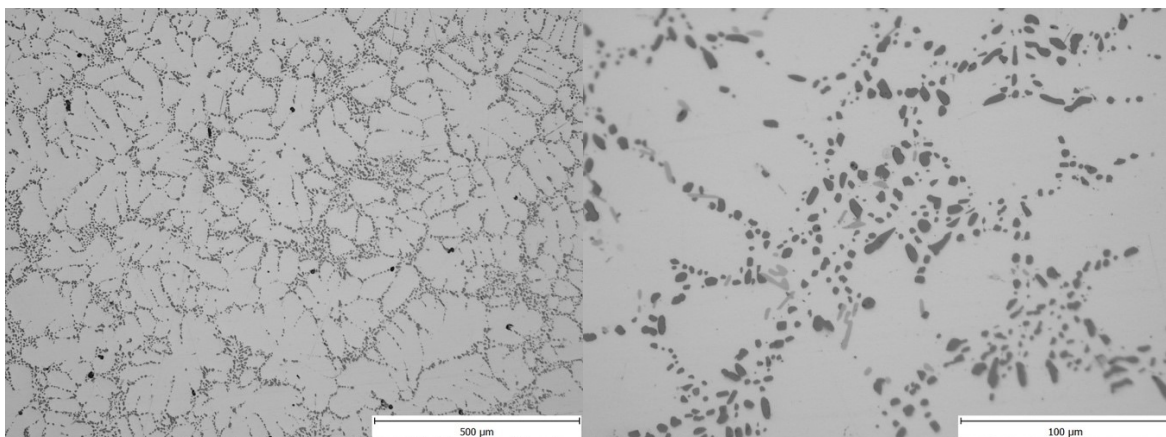


Vzorek 0 21 (100x a 500x zvětšení)

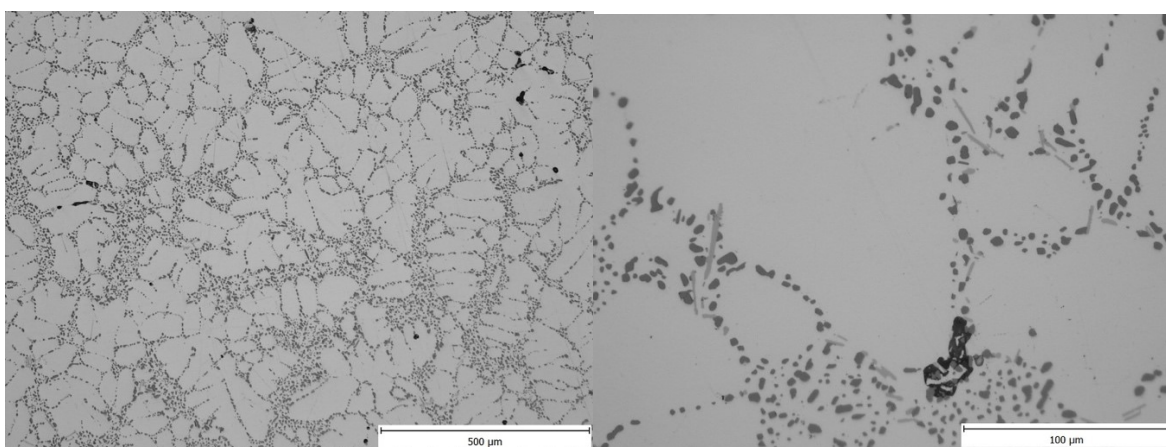


Vzorek 0 22 (100x a 500x zvětšení)

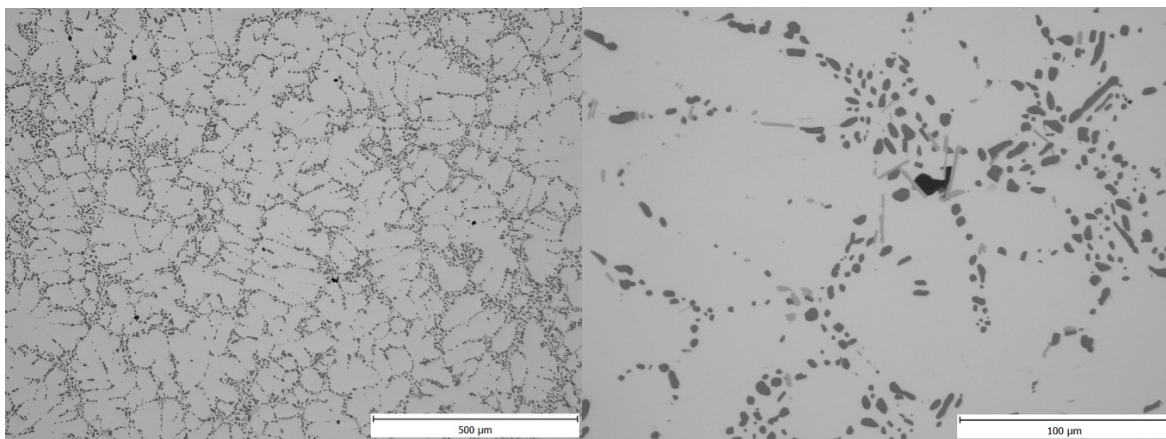




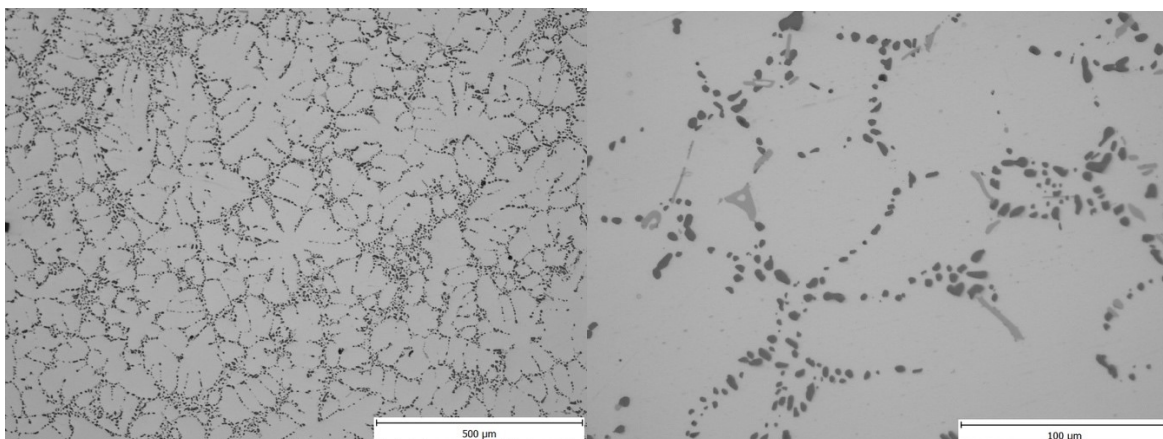
Vzorek 0 25 (100x a 500x zvětšení)



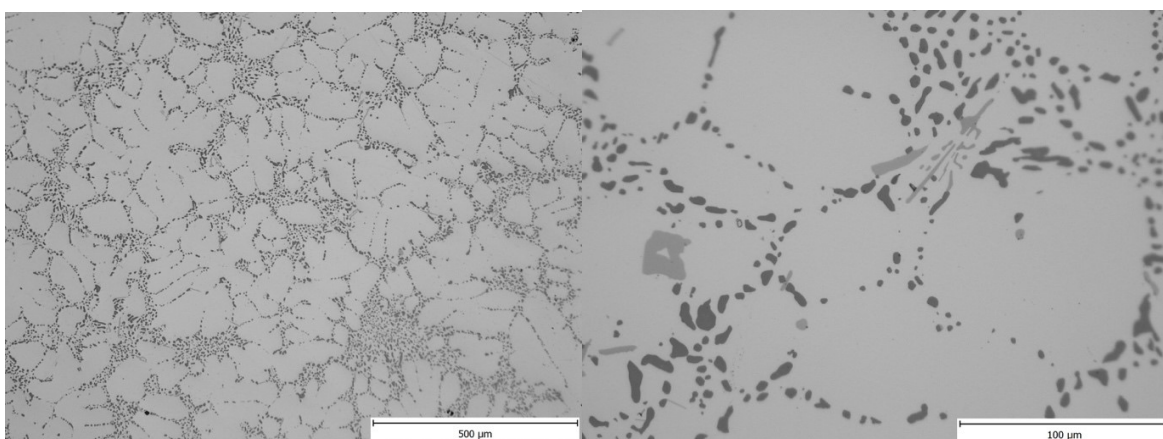
Vzorek 0 26 (100x a 500x zvětšení)



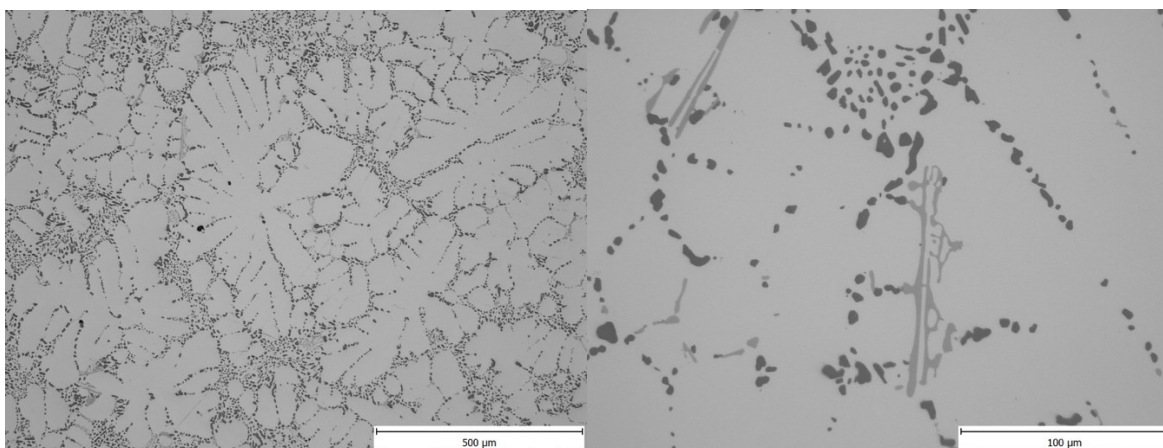
Vzorek 0 43 (100x a 500x zvětšení)



Vzorek 0 44 (100x a 500x zvětšení)

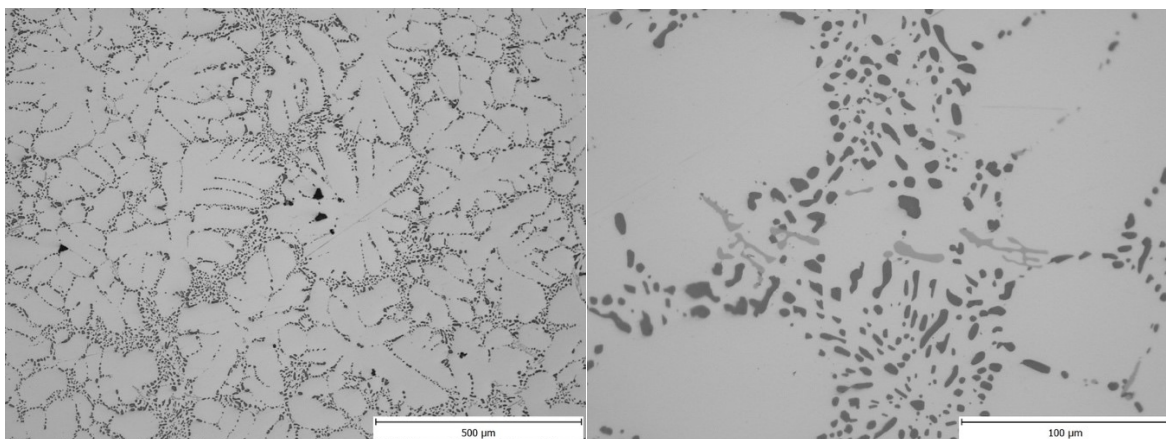


Vzorek 0 47 (100x a 500x zvětšení)

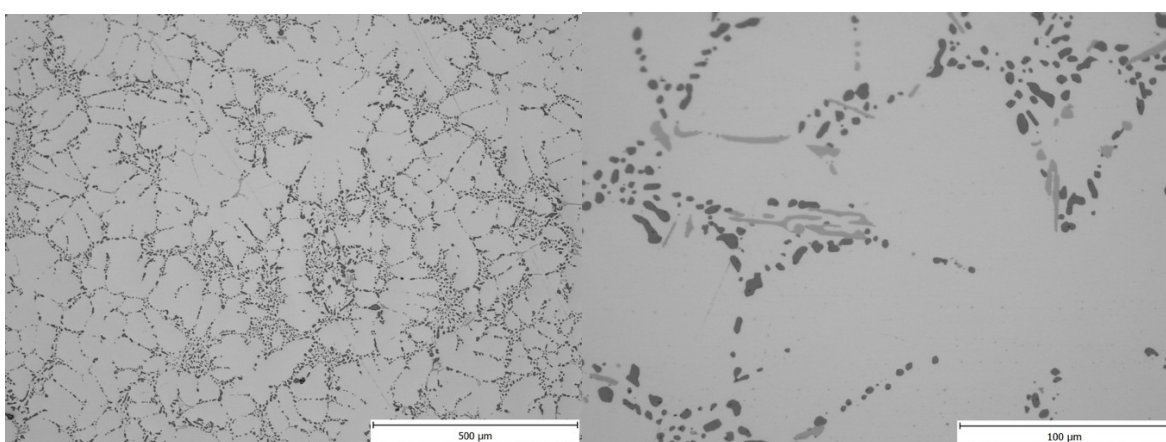


Vzorek 0 48 (100x a 500x zvětšení)

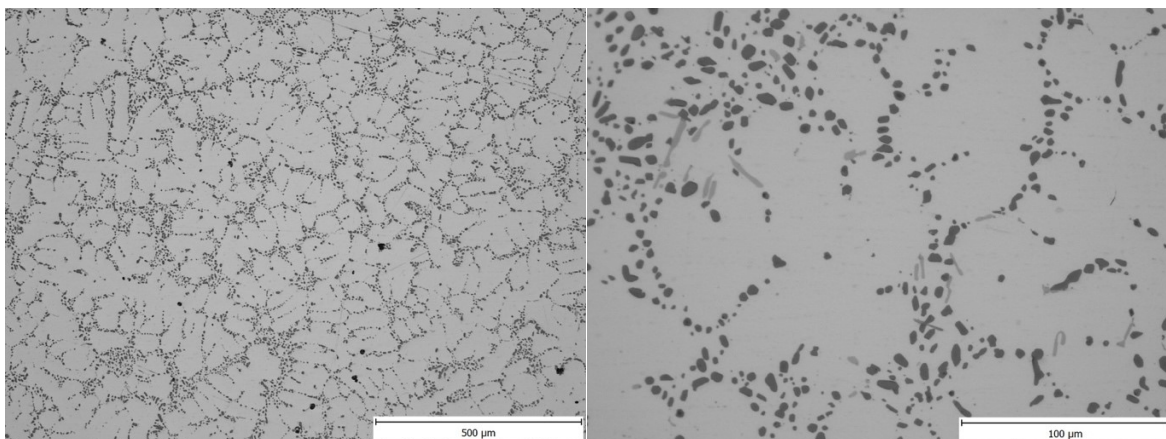




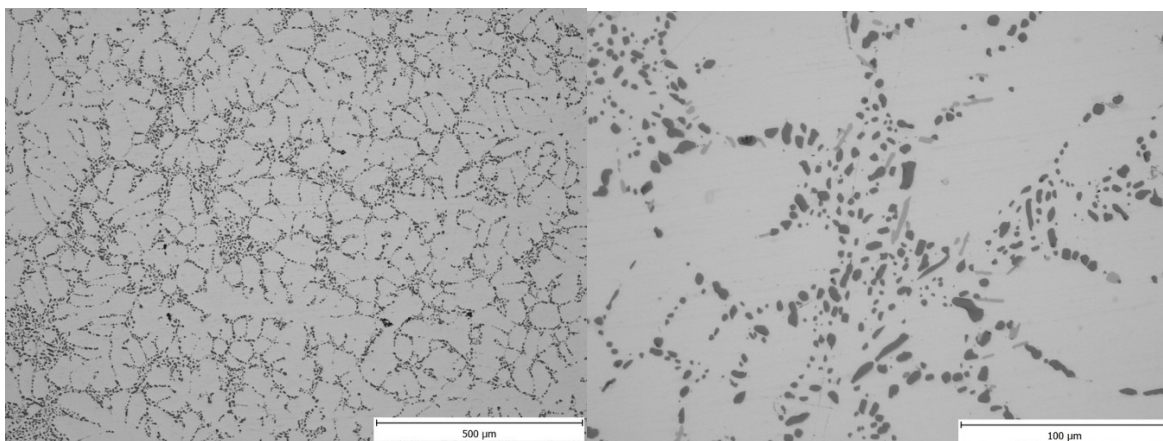
Vzorek 0 63 (100x a 500x zvětšení)



Vzorek 0 64 (100x a 500x zvětšení)



Vzorek 0 67 (100x a 500x zvětšení)



Vzorek 0 68 (100x a 500x zvětšení)